



Universidad  
Carlos III de Madrid

Departamento de Ingeniería Mecánica

Escuela Politécnica Superior

Ingeniería Industrial

PROYECTO FIN DE CARRERA

# Mantenimiento RCM del sistema de refrigeración del motor diésel de un buque

Autor: Raúl Mora de Céspedes

Tutora: Cristina Castejón Sisamón

Madrid, 27 de Febrero de 2014

## Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia el estar siempre ahí con sus consejos, ayuda, paciencia, exigencia y apoyo incondicional. Sin ellos todo lo que he logrado en la vida no hubiera sido posible. Nunca podré agradecer lo suficiente lo que hacen por mí día a día.

A Laura, por ser la persona que me llevó a cambiar la mentalidad pudiendo acabar mucho antes la carrera y por hacer de este viaje tan largo y arduo mucho más corto y llevadero.

Y por último, a mis compañeros de trabajo que siempre que he necesitado ayuda en el proyecto se han prestado a ello.

## Resumen

En este proyecto se realiza el plan de mantenimiento del sistema de refrigeración del motor diesel de un buque empleando la metodología de Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad, conocida como RCM.

**Palabras claves:** RCM, fiabilidad, modos de fallo, FMECA, tareas, tasa instantánea de fallos, severidad, riesgo, distribución de Weibull.

## Abstract

This project determines the maintenance plan of the cooling system of a diesel engine, belonging a vessel, developing the Reliability Centered Maintenance, known as RCM.

**Keywords:** RCM, reliability, failure modes, FMECA, tasks, instantaneous failure rate, severity, risk, Weibull distribution.

## ÍNDICE GENERAL

<b>1. Introducción y objetivos .....</b>	<b>10</b>
1.1 Introducción .....	10
1.2 Objetivos .....	11
1.3 Estructura de la memoria.....	12
<b>2. Evolución del mantenimiento.....</b>	<b>13</b>
<b>3. Tipos de mantenimiento .....</b>	<b>16</b>
3.1 Mantenimiento correctivo .....	16
3.2 Mantenimiento predictivo .....	17
3.3 Mantenimiento preventivo programado .....	19
<b>4. Mantenimiento centrado en la fiabilidad.....</b>	<b>21</b>
4.1 Antecedentes históricos.....	21
4.2 Concepto del RCM.....	22
4.3 Metas y objetivos del RCM.....	24
4.4 Proceso de implantación del RCM .....	25
4.4.1 Planificación .....	26
4.4.2 Formación del grupo de trabajo.....	27
4.4.3 Selección del sistema y definición del contexto operacional.....	28
4.4.4 AMEF: Análisis de los modos y efectos de fallo .....	31
4.4.4.1 Funciones de los activos .....	32
4.4.4.2 Definir los fallos funcionales asociados a cada función del activo .....	36
4.4.4.3 Definir los modos de fallo asociados a cada fallo funcional .....	38
4.4.4.4 Establecer los efectos o las consecuencias de cada uno de los modos de fallo .....	39
4.4.5 Proceso de selección de las actividades de mantenimiento bajo el enfoque del RCM .....	46
4.4.6 Proceso de revisión basado en RCM .....	49
4.4.7 Ventajas y desventajas de la implantación de la metodología RCM.....	49
4.5 Índices básicos de gestión del mantenimiento .....	51
4.5.1 Disponibilidad.....	53
4.5.2 Mantenibilidad .....	54
4.5.3 Fiabilidad .....	54
4.5.4 Patrones de fallo .....	55
4.5.4.1 Modelado de la tasa de fallos.....	59

<b>5. Instalación.....</b>	<b>62</b>
5.1 Introducción .....	62
5.2 Motor .....	62
5.2.1 Funcionamiento básico de un motor de combustión interna.....	63
5.2.2 Sistemas de refrigeración marinos.....	64
5.3 Descripción de la instalación: Sistema de refrigeración .....	65
5.3.1 Elementos de la instalación.....	68
5.3.1.1 Filtro.....	68
5.3.1.2 Bombas .....	70
5.3.1.3 Intercambiadores de calor.....	75
5.3.1.4 Válvulas de bola .....	79
5.3.1.5 Válvula de retención .....	80
5.3.1.6 Válvulas mezcladoras termostáticas de tres vías .....	81
5.3.1.7 Tanques de expansión .....	84
5.3.1.8 Tuberías y conexiones .....	85
<b>6. Aplicación del análisis RCM a la instalación .....</b>	<b>87</b>
6.1 Análisis RCM del sistema de refrigeración de un motor marino diesel .....	90
6.1.1 Funciones, fallos funcionales, modos de fallo y evidencia al fallo .....	90
6.1.2 Causa de los fallos de los equipos .....	95
6.1.2.1 Electrobomba (bomba de emergencia).....	96
6.1.2.2 Bombas centrífugas (Bomba de agua de mar, del circuito de alta temperatura y del circuito de baja temperatura).....	100
6.1.2.3 Filtro.....	102
6.1.2.4 Intercambiadores de calor tubo-carcasa (aceite de lubricación y aftercooler) .....	104
6.1.2.5 Intercambiadores de calor de placas (intercambiadores de calor de baja y de alta temperatura y enfriador de combustible) .....	105
6.1.2.6 Válvula de retención de la bomba de emergencia .....	106
6.1.2.7 Válvulas de mantenimiento y válvula del circuito de la bomba de emergencia .....	107
6.1.2.8 Tanques de expansión .....	108
6.1.2.9 Válvulas mezcladoras termostáticas de tres vías .....	109
6.1.2.10 Camisas del motor .....	110
6.1.2.11 Tuberías y conexiones .....	111
6.1.3 Efectos sobre equipo, sistema y buque y severidad del modo de fallo .....	112
6.1.4 Procedimiento de obtención del riesgo .....	133
<b>7. Selección de tareas.....</b>	<b>141</b>

7.1	Bomba de agua de mar, bomba del circuito de alta temperatura y bomba del circuito de baja temperatura .....	145
7.2	Intercambiador de calor de baja temperatura e Intercambiador de calor de alta temperatura .....	147
7.3	Enfriador de combustible .....	148
7.4	Filtro .....	149
7.5	Intercambiador de calor aceite de lubricación y aftercooler .....	150
7.6	Tanque de expansión del circuito de baja temperatura y tanque de expansión del circuito de alta temperatura .....	151
7.7	Válvula termostática del circuito de alta temperatura y válvula termostática del circuito de baja temperatura .....	152
7.8	Tuberías y conexiones .....	153
7.9	Válvula de retención de la bomba de emergencia, válvula del circuito de la bomba de emergencia y bomba de emergencia .....	154
7.10	Válvulas de mantenimiento .....	155
7.11	Camisas del motor diésel .....	156
<b>8.</b>	<b>Presupuesto .....</b>	<b>157</b>
<b>9.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>170</b>
<b>10.</b>	<b>Desarrollos futuros .....</b>	<b>171</b>
<b>11.</b>	<b>Bibliografía .....</b>	<b>172</b>

## Índice de figuras

Figura 1: Curva comportamiento de fallos potenciales.....	18
Figura 2: Preguntas claves del RCM.....	24
Figura 3: Proceso de implantación de RCM.....	26
Figura 4: Integrantes del grupo de trabajo RCM .....	28
Figura 5: Categorías de las consecuencias de los modos de fallo .....	42
Figura 6: Evaluación de tareas RCM .....	47
Figura 7: Selección del tipo de tarea de mantenimiento.....	48
Figura 8: Distribución de fallos del equipo .....	52
Figura 9: Patrones de fallo .....	56
Figura 10: Curva S-N .....	58
Figura 11: Curva de la bañera .....	60
Figura 12: Diagrama de bloques de entradas y salidas de un motor .....	64
Figura 13: Esquema del sistema de refrigeración con intercambiadores de calor .....	66
Figura 14: Filtro HSBI .....	69
Figura 15: Esquema de una bomba centrífuga de eje vertical .....	71
Figura 16: Funcionamiento de un intercambiador de placas.....	75
Figura 17: Intercambiador tubo-carcasa .....	78
Figura 18: Camisa de un motor.....	78
Figura 19: Funcionamiento de una válvula de bola.....	79
Figura 20: Esquema del funcionamiento de una válvula de retención .....	81
Figura 21: Esquema de una válvula mezcladora termostática de tres vías.....	83
Figura 22: Tanque de expansión.....	84
Figura 23: Unión mediante brida entre dos tuberías .....	86
Figura 24: Patrón de fallo de los equipos dinámicos de la instalación.....	134
Figura 25: Patrón de fallo de los equipos estáticos de la instalación .....	136



## Índice de tablas

Tabla 1: Características técnicas del filtro .....	70
Tabla 2: Características técnicas de la bomba de agua de mar .....	72
Tabla 3: Características técnicas de la bomba del circuito de baja temperatura.....	72
Tabla 4: Características técnicas de la bomba del circuito de alta temperatura.....	73
Tabla 5: Características técnicas del motor de la bomba del circuito de alta temperatura.	74
Tabla 6: Características técnicas de la bomba de emergencia .....	74
Tabla 7: Características técnicas del intercambiador de baja temperatura .....	76
Tabla 8: Características técnicas del intercambiador de alta temperatura.....	77
Tabla 9: Matriz de criticidad .....	88
Tabla 10: Relación entre $\beta$ y MTBF/ $\eta$ .....	135
Tabla 11: Tiempo de funcionamiento de los equipos según el porcentaje de utilización .	143

## 1. Introducción y objetivos

### 1.1 Introducción

En la actualidad, el mantenimiento industrial ha adquirido una gran importancia. Esto es debido a que un adecuado mantenimiento origina grandes ahorros económicos para la empresa en cuestión. Con un plan de mantenimiento apropiado se evitan posibles fallos que pueden ocasionar daños más graves al equipo.

Dejando a un lado la gran reducción de costes que conlleva realizar un buen mantenimiento de los equipos de una instalación, y siendo conscientes de la alta importancia que tiene actualmente la disminución de los gastos totales de cualquier proceso industrial para aumentar la competitividad, la razón más relevante por la que se están implantando y mejorando los procesos de mantenimiento es la de evitar posibles accidentes tanto humanos como medioambientales que puedan, incluso, llegar a tener pérdidas humanas.

A principios del siglo XX, simplemente se reparaba el equipo en caso de avería y se realizaban limpiezas, lubricaciones y engrases periódicos. A mediados del siglo XX, a partir de la Segunda Guerra Mundial, el objetivo era la duración máxima de los equipos con los costes más bajos posibles en condiciones operativas adecuadas, produciéndose la incorporación de mantenimientos preventivos. En torno a la década de 1980 empezó a tener relevancia y ser prioritarias la seguridad, la calidad y la protección del medio ambiente.

Existen diversos tipos de mantenimiento entre los cuales se encuentran el mantenimiento según condición (MOC, Maintenance On Condition) y el mantenimiento preventivo que están encaminados a intervenir en la máquina antes de que se produzca el fallo o deterioro catastrófico gracias al análisis de la evolución de una variable significativa. En paralelo, se encuentran las filosofías de mantenimiento TPM (Total Productive Maintenance) basado en el mantenimiento autónomo que es llevado a cabo por los propios operarios de producción y la filosofía de mantenimiento RCM (Reliability Centered Maintenance) que tiene en cuenta el posible impacto que pueden provocar los fallos de estos equipos en: la seguridad humana, las operaciones, la economía y el medioambiente. [1]

Por las razones expuestas, es fundamental realizar un óptimo mantenimiento de los equipos para aumentar así la vida útil de los mismos, ahorrar en costes y prevenir fallos que puedan producir pérdidas humanas, lesiones graves o desastres medioambientales.

## 1.2 Objetivos

El objetivo fundamental de este proyecto es el conocimiento y aplicación del método de mantenimiento RCM del sistema de refrigeración de un motor marino de un buque.

Para llevar a cabo este objetivo con éxito, el proyecto se divide en distintos objetivos parciales, que son los siguientes:

- Conocimiento de la evolución del mantenimiento. Se describe el desarrollo que ha tenido el mantenimiento a lo largo de su historia para poder tener una visión global de la situación actual.
- Definición de los distintos tipos de mantenimiento utilizados en el proyecto. Éstos son los siguientes: mantenimiento correctivo, mantenimiento predictivo y mantenimiento preventivo programado.
- Definición de los conceptos de fiabilidad y tasa instantánea de fallos. Forma de calcular la fiabilidad y tasa instantánea de fallos a partir de la distribución de Weibull, así como los diferentes patrones de fallo existentes según la dependencia de la tasa de fallos respecto al tiempo.
- Conocimiento de qué es una instalación hidráulica, debido a que la instalación a mantener (sistema de refrigeración de un motor marino) es de este tipo.
- Descripción de los elementos que componen un sistema de refrigeración de un motor marino y su funcionamiento. Es fundamental el conocimiento de cada componente del sistema de refrigeración para poder realizar un adecuado mantenimiento.
- Conocimiento de cómo se realiza un presupuesto de un mantenimiento RCM. Para ello, se tiene en cuenta el coste de mano de obra y de los recursos utilizados, como son: las herramientas, piezas de sustitución, etc.

### 1.3 Estructura de la memoria

En el capítulo 2 se describe el desarrollo que ha tenido el mantenimiento a lo largo de su historia para poder tener una visión global de la situación actual.

Posteriormente, en el capítulo 3, se explicarán los distintos tipos de mantenimiento que se utilizarán en el proyecto, como son: el mantenimiento correctivo, el mantenimiento predictivo y el mantenimiento preventivo.

En el capítulo 4 se define y explica detalladamente la filosofía RCM, que es la elegida para realizar el mantenimiento de la instalación a la cual se le quiere realizar el mantenimiento (sistema de refrigeración del motor diésel de un buque).

A continuación, en el capítulo 5, se describe minuciosamente el funcionamiento de la instalación en su conjunto así como de todos los elementos que componen el sistema.

En el capítulo 6 se aplica el análisis RCM del sistema de refrigeración del motor diésel del buque. Para ello, se realiza el FMECA (Failure Mode Effects and Criticality Anlysis) que es un análisis de cómo afectan los fallos de los equipos al buque.

Una vez concluido el FMECA se seleccionan, a lo largo del capítulo 7, las tareas adecuadas para cada equipo según las consecuencias que los fallos de dichos equipos tengan sobre el buque.

En el capítulo 8 se desarrolla el presupuesto del mantenimiento del sistema de refrigeración del motor diésel del buque teniendo en cuenta la mano de obra así como los recursos utilizados.

Por último, se presentan las conclusiones en el capítulo 9 y los desarrollos futuros en el capítulo 10.

## 2. Evolución del mantenimiento

La evolución del mantenimiento durante el siglo XX se compone de tres grandes etapas a las que se le denominan Primera, Segunda y Tercera generación, que dan una clara idea de cuál ha sido el desarrollo de las técnicas y organizaciones que se han ido implementando durante dicho siglo, aunque estas tres etapas no tienen una frontera clara entre ellas desde el punto de vista temporal, ya que cada sector de la industria ha evolucionado de forma diferente. La aeronáutica siempre ha ido por delante de los demás sectores por lo que los diferentes periodos se refieren a los sectores convencionales y no al de la aviónica. [1]

La Primera Generación comprende aproximadamente desde los años 30 hasta mediados de los años 50 o la Segunda Guerra Mundial, en la que las actividades de mantenimiento se ceñían a reparar aquello que se averiaba, y a periódicos reengrases, lubricaciones y limpiezas. En esta época los equipos eran simples, robustos y se sobredimensionaban. Sus actividades no demandaban mucha destreza y no existía la alta mecanización de la industria, ocasionando este hecho bajos volúmenes de producción y, como consecuencia, se le daba poca importancia al tiempo de parada de los equipos.

En dicha época los modos de fallo estaban concentrados en el desgaste de pieza y metalúrgicos. La prevención de fallos en los equipos no era de alta prioridad gerencial, siendo la política de mantenimiento aplicada la de mantenimiento reactivo o de reparación, no habiendo necesidad de un mantenimiento sistemático.

La Segunda Generación empieza a partir de la Segunda Guerra Mundial, seguramente motivado por avances en sectores industriales fabriles para la industria armamentística y por la evolución del mundo de la aviación, acabándose a mediados de los años 70. En ella se definen como objetivos una mayor disponibilidad operacional de los medios de producción, barcos, aviones y ferrocarriles, así como una mayor duración de los equipos en condiciones operativas idóneas (por lo que debían tener mayor fiabilidad) con los mínimos costes posibles. Todo esto es debido a la enorme competencia industrial habida en esta época que, en el intento de conseguir mejores resultados, trae consigo cambios en la mentalidad obteniendo grandes mejoras en la industria.

Por primera vez, se comienza a dar importancia a la productividad, incrementándose la mecanización de las industrias y complejidad de los equipos, dándole mayor valor a las paradas de los equipos. Se inicia el concepto de mantenimiento preventivo. En los años 60 éste

consistía principalmente en mantenimientos mayores (OverHaul [2]) de acuerdo a una frecuencia fija, es decir, revisiones cíclicas. Estas revisiones cíclicas se definen con base en la “curva de la bañera”, que se explicará más adelante, en la que para equipos mecánicos y electromecánicos, tras un período denominado “de mortalidad infantil” en el que se llevan a cabo los primeros ajustes y puestas en marcha y se producen los fallos de falta de calidad de subconjuntos, aparece un período continuo de vida útil en el que no es necesario intervenir en el elemento salvo para subsanar un pequeño número de averías, ciertos reengrases o inspecciones puntuales. Dependiendo del sector, estas revisiones cíclicas se definen según un factor distinto, como pueden ser el número de horas de vuelo, kilómetros recorridos, número de horas de trabajo, etc. En esta Segunda Generación también se realizan las operaciones precisas en caso de fallos.

En esta etapa se produce un crecimiento rápido de los costes de mantenimiento al compararlos con otros costes de operación, asimismo se comienza la implantación y el crecimiento de sistemas de planificación y control de mantenimiento. Se intenta maximizarla vida útil de la infraestructura, sistemas, equipos y dispositivos, por incremento del capital asociado a la adquisición de los mismos. Empieza a haber una mayor implicación de las gerencias con la fuerza laboral hacia la definición de las tareas de mantenimiento y se producen altos niveles de inventario de repuestos. Por último, se realiza una informatización mediante computadoras centrales, lentas, cuyos programas no permitían la interacción efectiva con el usuario. Los sistemas de planificación y control se fueron implantando en bases de datos informatizadas, cuyo tratamiento optimizaba los sistemas de toma de decisiones. Para facilitar la labor a los responsables de mantenimiento aparecieron herramientas de software.

En la década de los 80 se llegó a un estancamiento del mantenimiento de Segunda Generación ya que la mejora de cualquiera de los tres índices más definitorios, como son la fiabilidad, la disponibilidad y los costes, implicaba el detrimento o empeoramiento, por lo menos, de una de las otras dos. Debido a este estancamiento surge la Tercera Generación, en la que hay un alto grado de mecanización y automatización, dando importancia a la productividad y altos volúmenes de producción e incorporándose el interés por los estándares de calidad. Se tiene gran consideración por la disponibilidad y fiabilidad de la infraestructura, sistemas, equipos y dispositivos, así como por los costes de mantenimiento en su contribución a la optimización y control de costes de las empresas, es decir, tener una alta efectividad en el control de costes. A estos tres aspectos (fiabilidad, disponibilidad y costes de mantenimiento)

hay que sumarle la importancia que se le empieza a dar a la seguridad, siendo prioritario la protección integral de las personas, equipos y medio ambiente, con una gran tendencia a la emisión de normativas, leyes, etc. Como en la etapa anterior, se pretende extender al máximo la vida útil de la infraestructura, sistemas, equipos y dispositivos, así como realizar análisis detallados de los costes del ciclo de vida, siendo este factor determinante en la toma de decisiones en la compra de nuevos equipos. No sólo era importante que el sistema, instalación o equipo fuera fiable y mantenible, sino que era necesario que su coste total de ciclo de vida (entendiendo como tal la primera inversión), los costes financieros y los costes de operación, mantenimiento y reemplazo, fueran los menores posibles, o cuanto menos, contenidos. [1]

Por otro lado, la competitividad se entiende como factor de supervivencia de las empresas. El personal de mantenimiento empieza a tener un alto nivel de competencia. Hay un desarrollo acelerado de la tecnología de información, computadoras más rápidas, pequeños programas más amigables, integración de redes a través de estaciones de trabajo y sistemas expertos. También se desarrolla el mantenimiento predictivo y se introducen métodos más proclives a intervenir en los equipos o instalaciones sólo cuando es necesario, y no actividades preventivas rutinarias como en la época anterior. Aparecen filosofías como Mantenimiento Productivo Total (TPM) y Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM). Se aborda la necesidad de contemplar en el diseño de equipos la fiabilidad y mantenibilidad para la mejora de estos, y una vez que están en servicio realizar reingeniería, es decir, revisar desde cero los procesos de mantenimiento.

Se introduce una nueva herramienta para las estrategias de mantenimiento, que es el análisis de riesgos. Se estudia si el fallo supone un riesgo importante o si, en cambio, es mínimo y asumible para decidir si es más rentable dejar que falle o por el contrario es mejor realizar un mantenimiento para evitarlo. También es importante saber las causas y efectos de los fallos ya que los mismos equipos no fallan de igual manera en un lugar que en otro, por lo que si las causas son diferentes las acciones también deben ser diferentes.

Por último, aparece la externalización como una manera de reducir costes en una primera etapa y aumentar la flexibilidad. Asimismo, con dicha externalización las empresas pueden centrarse en su actividad sin perder tiempo en otras tareas que le podrían hacer olvidar y alejarse del objetivo principal.[1]

### 3. Tipos de mantenimiento

Existen varios tipos de mantenimiento, entre ellos están los siguientes: mantenimiento correctivo (de urgencia), predictivo, preventivo programado, así como las filosofías de mantenimiento TPM (Total Productive Maintenance) y RCM (Reliability Centered Maintenance). Se ha mencionado el mantenimiento productivo total (TPM) para dejar constancia de que existen otras filosofías a parte del RCM, pero no se va a explicar en qué consiste debido a que no es el mantenimiento que se va a realizar en la instalación.

Todos los mantenimientos, en general, persiguen los mismos objetivos [3]:

- Evitar, reducir, y en su caso, reparar, los fallos sobre los bienes.
- Disminuir la gravedad de los fallos que no se lleguen a evitar.
- Evitar detenciones inútiles o paros de máquinas.
- Evitar accidentes.
- Evitar incidentes y aumentar la seguridad para las personas.
- Conservar los bienes productivos en condiciones seguras y preestablecidas de operación.
- Reducir costes.
- Alcanzar o prolongar la vida útil de los bienes.

#### 3.1 Mantenimiento correctivo

El mantenimiento correctivo es un conjunto de actividades de reparación y sustitución de elementos deteriorados por repuestos, que se realizan cuando aparece el fallo.

Este tipo de mantenimiento era el único que se efectuaba hasta después de la Segunda Guerra Mundial, que es cuando se empezó a introducir paulatinamente otras tecnologías de mantenimiento. Es una tarea de urgencia, ya que sólo se actúa en caso de averías o defectos en el equipo. Su utilización es adecuada en sistemas complejos e imposibles de predecir el fallo o en los casos en los que no haya más remedio que sustituir un elemento que se haya averiado de manera imprevista. El mantenimiento correctivo tiene dos principales inconvenientes:

- Puede causar daños en otros elementos.



- Se requiere de gran capital invertido en piezas de repuestos.

### 3.2 Mantenimiento predictivo

El Mantenimiento Predictivo debe entenderse como aquella metodología que basa las intervenciones en la máquina o instalación sobre la que se aplica, en la evolución de una determinada variable que sea realmente identificadora de su funcionamiento y fácil de medir. Estas tareas predictivas, que son actividades programadas en base a condición, se basan en el hecho de que la mayoría de los modos de fallo no ocurren instantáneamente, sino que se desarrollan progresivamente durante un periodo de tiempo. Si la evidencia de este tipo de modos de fallo puede ser detectada bajo condiciones normales de operación, es posible que se puedan tomar acciones programadas en base a la condición del activo que ayuden a prevenir estos modos de fallo y/o eliminar sus consecuencias. El momento en el proceso en el cual es posible detectar que el fallo funcional está ocurriendo o está a punto de ocurrir es conocido como fallo potencial. De esta forma, se puede definir fallo potencial como una condición física identificable la cual indica que el fallo funcional está a punto de ocurrir o que ya está ocurriendo dentro del proceso.[2] [4]

El comportamiento en el tiempo de gran parte de los distintos tipos de modos de fallo se ilustra en la Figura 1. En esta figura, se muestra como un fallo comienza a ocurrir, incrementado su deterioro hasta el punto en el cual el fallo puede ser detectado (punto de fallo potencial). Si en este punto el fallo no es detectado y corregido, continúa aumentando su deterioro (usualmente de forma acelerada) hasta que alcanza el punto donde se produce el fallo funcional, donde el activo ha dejado de cumplir su función.

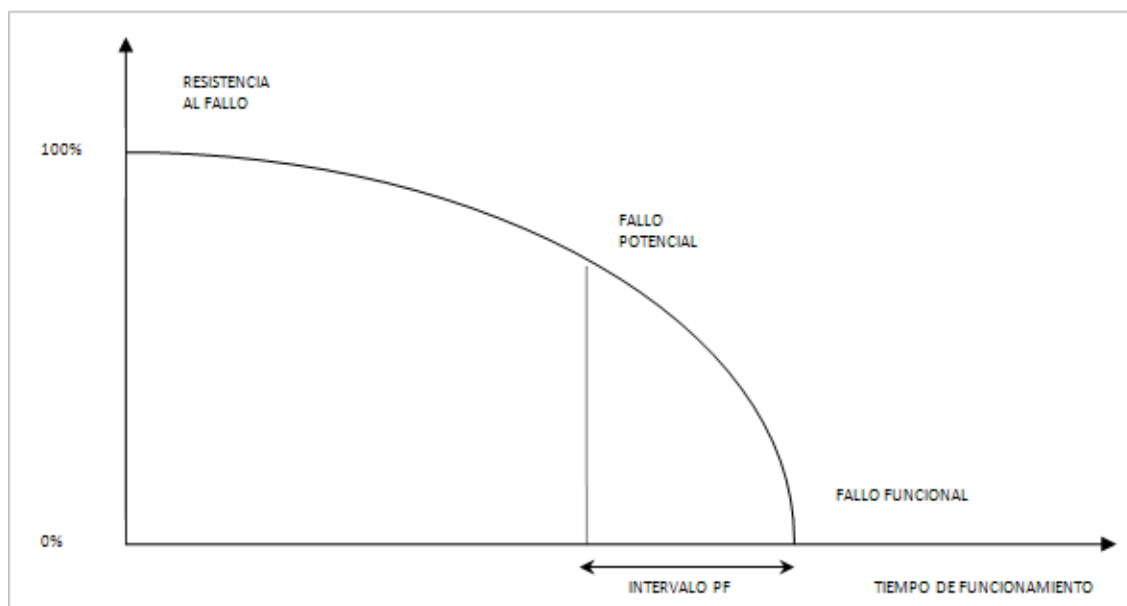


Figura 1: Curva comportamiento de fallos potenciales [2]

Las principales técnicas que se utilizan en el mantenimiento predictivo son:

- **Análisis de vibraciones:** todas las máquinas vibran en funcionamiento, y dicha vibración almacena gran cantidad de información útil para conocer el estado de la máquina y con ello poder programar la intervención cuando sea necesaria, es decir, cuando las condiciones de deterioro han pasado de un determinado punto y antes de que se llegue a producir la avería o el paro de la misma. Las técnicas de diagnosis pueden ser mediante la medición de las vibraciones, impulsos de choque o analizador de frecuencias y se realizan a toda máquina rotativa.
- **Análisis de aceites o lubricantes:** cuyas variables identificadoras son la viscosidad, partículas y degradación de los lubricantes mediante técnicas de diagnosis tales como la monitorización del color, oxidación o análisis espectroquímicos. Los equipos a los que se les efectúan este análisis son los reductores, las cajas de cambio, motores térmicos y compresores.
- **Análisis de la temperatura:** mediante la detección de un punto, zona o componente anormalmente caliente respecto a zonas colaterales con homólogo funcionamiento se podrán encontrar anomalías. Como técnicas de diagnosis se utilizan la termografía, la pintura térmica y los adhesivos de bandas para sistemas estáticos, térmicos, eléctricos y electrónicos.

- **Análisis de valor óhmico y capacidad:** Los bobinados de las máquinas eléctricas rotativas pueden analizarse mediante el estudio de su resistencia óhmica y mediante ondas de choque de absorción, conducción y reabsorción destinadas a detectar cortocircuitos entre espiras.
- **Análisis de corrosión:** muchos metales son afectados por la corrosión. Las técnicas de diagnóstico utilizadas son los ultrasonidos, detector de gas, radioscopio y magnetoscopio siendo útiles en depósitos, tuberías, cráteres, calderas, etc. En definitiva, cualquier equipo metálico.
- **Ensayos no destructivos:** útiles para detección de grietas o defectos superficiales. Se emplean técnicas como la inspección visual, líquidos penetrantes o partículas magnéticas en casos superficiales, y ultrasonidos y radiografía en casos volumétricos.

### 3.3 Mantenimiento preventivo programado

El mantenimiento preventivo programado se refiere a las actividades periódicas que se llevan a cabo para restaurar un activo (sistema, equipo, componente) a su condición original. Es decir, son aquellas actividades de prevención realizadas a los activos (en la mayoría de los casos equipos mayores) a un intervalo de frecuencia menor al límite de vida operativo del activo, en base al análisis de sus funciones en el tiempo.

En este tipo de actividades de mantenimiento preventivo, los activos son puestos fuera de servicio, se desarmen, se desmontan, se inspeccionan de forma general y se corrigen y reemplazan, de ser necesario, partes defectuosas con el fin de prevenir la aparición de posibles modos de fallo. Las tareas preventivas programadas son conocidas como "overhauls", y su aplicación más común es en equipos mayores: compresores, turbinas, calderas, hornos, bombas de múltiples etapas, etc.

Dentro de estas tareas preventivas programadas se pueden incluir dos tipos de actividades distintas:

- Mantenimiento reglamentario o legal.
- Mantenimiento de seguridad.

El mantenimiento reglamentario o legal es aquél que se realiza para cumplir con las especificaciones exigidas por las leyes. El individuo, el cual es responsable de que se cumplan las inspecciones periódicas de las instalaciones, es el propietario de dichas instalaciones.

Este tipo de mantenimiento adquiere una gran transcendencia ya que, en el caso de que no se cumplan, puede llevar como consecuencia el abrir un expediente sancionador a la empresa infractora, con la posible parada de dicha actividad si hubiese algún peligro manifiesto para las personas. De ahí, la gran importancia de realizar los mantenimientos periódicos en los plazos exigidos por las leyes.

En lo referente al mantenimiento de seguridad se basa en salvaguardar y proteger la integridad física de las personas. En muchas ocasiones dichas tareas las define el propio fabricante del equipo como de obligado cumplimiento. En otras ocasiones, se definen dentro de la empresa y se contrata a una entidad certificadora independiente para que revise las mismas con sus periodicidades y corrobore, mediante un certificado ex profeso, la idoneidad de las mismas para el sistema o instalación en concreto. Con ello se consigue que ante cualquier percance, se pueda demostrar que no se ha pasado por alto ninguna de estas intervenciones y no se ha incurrido en ningún tipo de negligencia.

## **4. Mantenimiento centrado en la fiabilidad**

### **4.1 Antecedentes históricos**

El Mantenimiento Centrado en Fiabilidad, conocido como RCM debido a sus siglas en inglés (Reliability Centered Maintenance), se originó hacia el final de la década de los años 60, en un esfuerzo conjunto del gobierno y la industria aeronáutica norteamericana, a fin de establecer un proceso lógico y diseñar actividades de mantenimiento apropiadas con frecuencias óptimas para estas actividades, para atender al advenimiento de nuevas aeronaves de mayor tamaño, capacidad y complejidad. Se aplicó por primera vez a gran escala para el mantenimiento del Boeing 747, usándose posteriormente para el DC-10, y así fue extendiéndose a una gran parte de la aeronáutica. La complejidad de los nuevos sistemas hacía casi imposible que fueran mantenidos con los antiguos conceptos y políticas. El objetivo marcado fue el de establecer procedimientos de mantenimiento apropiados que permitieran reducir los tiempos de parada por mantenimiento, reducir los costes de mantenimiento e incrementar la seguridad de los vuelos. Como resultado de este esfuerzo se publicó el documento "MSG-I: Maintenance Evaluation and Program Development", el cual formaliza y establece nuevos criterios para el desarrollo de programas de mantenimiento. Anteriormente a la publicación del MSG-I, los programas de mantenimiento estaban diseñados para ser ejecutados en cada equipo, sin considerar la importancia de éste en el funcionamiento del sistema. La importancia de este documento radica en el cambio de los paradigmas existentes hasta ese momento para la conceptualización de las políticas de mantenimiento. A partir de la publicación de este documento, la orientación cambia desde la evaluación de las funciones del equipo hacia el análisis de las funciones del sistema.[2] [4]

Posteriormente, se publicó el documento MSG-2, para generalizar en toda la industria aeronáutica el uso de los procedimientos desarrollados en el MSG-I. En este segundo documento se incorporó una herramienta simple pero poderosa, llamada árbol de decisión lógico. Un árbol de decisión es un diagrama que provee una secuencia de preguntas acerca de una serie de posibles eventos y sus consecuencias, estructuradas de manera lógica y jerárquica. Cada pregunta en el árbol de decisión sólo puede ser contestada con un SI o un NO. La respuesta a cada pregunta puede conducir a una acción o a la próxima pregunta en la secuencia. Cada posible fallo de un sistema es categorizado mediante la aplicación del árbol lógico de preguntas, conduciendo al evaluador a un análisis lógico que finaliza al obtener una

respuesta SI. En cada respuesta NO, el evaluador continúa con la siguiente pregunta en la secuencia. Si se alcanza el final del árbol, entonces la conclusión lógica es que no se requiere ninguna actividad para el fallo bajo evaluación.

El documento MSG-2 se convirtió en un estándar de la industria aeronáutica para el diseño y ejecución de políticas de mantenimiento, el cual contiene las bases de lo que actualmente se denomina mantenimiento centrado en fiabilidad.

El éxito del RCM en la industria aeronáutica no tuvo precedentes. En un periodo de 16 años posterior a su implantación, las aerolíneas comerciales no tuvieron incremento en los costes unitarios de mantenimiento, aún cuando el tamaño y complejidad de las aeronaves, así como los costes de mano de obra, se incrementaron durante dicho periodo. Además, para ese mismo periodo, se incrementaron los records de seguridad de las aerolíneas.

Los beneficios obtenidos por la industria aeronáutica no fueron un secreto y pronto el RCM fue adaptado y adecuado a las necesidades de otras industrias. La industria militar comenzó a utilizarla en la década de 1970, el EPRI (Electric Power Research Institute) la empieza a aplicar en el campo nuclear en 1982, y otras industrias tales como la generación de potencia mediante energía solar, la industria manufacturera, de procesamiento de alimentos, minera, transporte marítimo, de procesamiento de hidrocarburos y productos químicos también comienzan a emplearla. En todas ellas, se presentan resultados exitosos de cara a mantener o incrementar la disponibilidad y al mismo tiempo obtener ahorros en los costes del mantenimiento. Todavía hoy, algunos detalles del método se encuentran en desarrollo, para adaptarse a las cambiantes necesidades de una amplia variedad de industrias, aunque los principios básicos se mantienen.

## 4.2 Concepto del RCM

El RCM sirve de guía para identificar las actividades de mantenimiento con sus respectivas frecuencias a los activos más importantes de un contexto operacional. No se trata de una fórmula matemática, sino que su éxito se apoya, principalmente, en el análisis funcional de los activos de un determinado contexto operacional realizado por un grupo natural de trabajo. El esfuerzo desarrollado por el grupo natural de trabajo permite generar un sistema de gestión de mantenimiento flexible, que se adapta a las necesidades reales de mantenimiento de la

organización y que tiene en cuenta la seguridad personal, el ambiente, las operaciones y la razón coste/beneficio. [4]

El RCM se puede definir de la siguiente forma: Filosofía de gestión del mantenimiento en la que un equipo multidisciplinario de trabajo se encarga de optimizar la fiabilidad operacional de un sistema que funciona bajo condiciones de trabajo definidas, estableciendo las actividades más efectivas de mantenimiento en función de la criticidad de los equipos pertenecientes a dicho sistema, y teniendo en cuenta los posibles efectos que originaran los modos de fallo de estos equipos sobre la seguridad, el medio ambiente y las operaciones[3] [5]. Es decir, el RCM es una metodología que permite identificar estrategias efectivas de mantenimiento que garantizan el cumplimiento de los estándares requeridos por los procesos de mantenimiento.

El RCM es una herramienta que permite ajustar las acciones de control de fallos (estrategias de mantenimiento) al entorno operacional, cuyos resultados tendrán mayor impacto en sistemas complejos con diversidad de modos de fallo. Es una metodología basada en un procedimiento sistemático que permite generar planes óptimos de mantenimiento, cuya implantación es lenta por lo que hay que planificarlo para el medio o el largo plazo.

La metodología RCM propone un procedimiento que permite identificar las necesidades reales de mantenimiento de los activos en su contexto operacional, a partir del análisis de las respuestas a las siete preguntas mostradas en la siguiente figura:

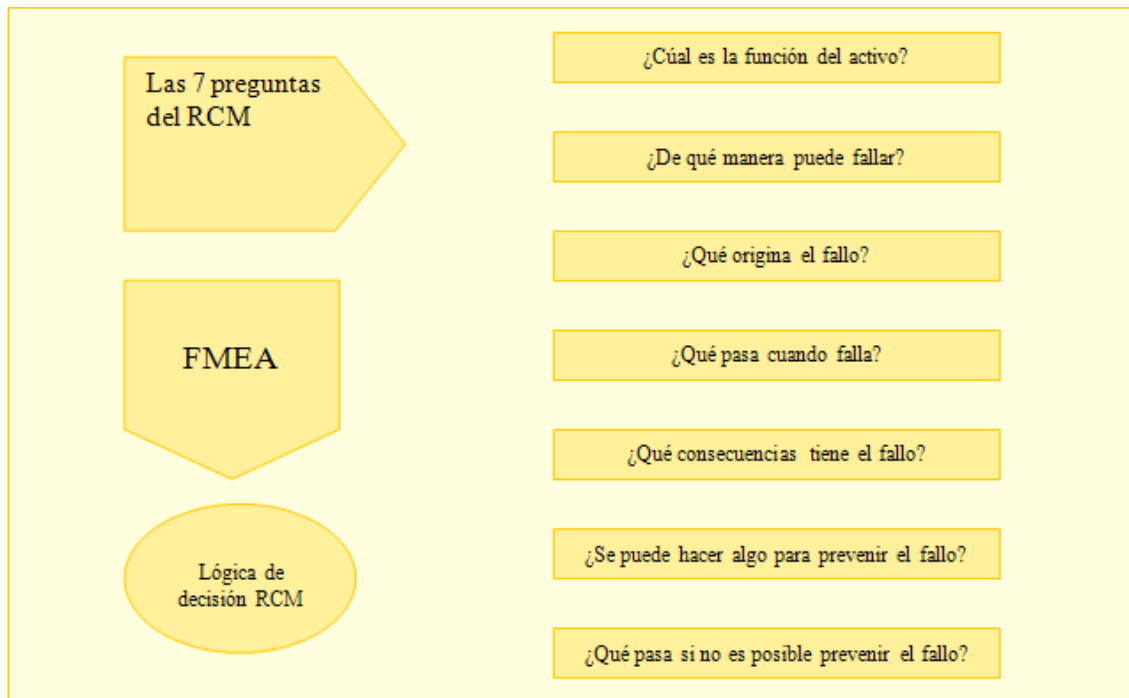


Figura 2: Preguntas claves del RCM [2]

### 4.3 Metas y objetivos del RCM.

La implantación de esta metodología persigue mejorar en diversos aspectos como son: el coste, el servicio, la calidad, el tiempo y los riesgos.[1]

Los beneficios a perseguir como metas en un mantenimiento centrado en fiabilidad en cuanto a costes son:

- Reducir los niveles y costes del mantenimiento preventivo rutinario (10 a 40 %).
- Definir directrices y objetivos concretos para sustituir preventivos rutinarios por predictivos.
- Reducir los niveles de mantenimiento contratado y sus importes.
- Reducir las paradas en producción de forma rentable haciendo reingeniería.

Los beneficios que se persiguen en el servicio son:

- Conocer mejor los requerimientos de servicio del cliente.
- Definir de forma consensuada niveles de calidad de servicio.
- Reducir las averías con especial incidencia en las que repercuten en el servicio.



- Mejor comunicación entre mantenimiento y producción.

En cuanto al tiempo, se pretenden las siguientes mejoras:

- Reducción en las paradas programadas para grandes revisiones.
- Intervalos normalmente más largos entre paradas por seguimiento predictivos.
- Tiempos de reparación más cortos por mejor conocimiento del sistema en su conjunto.

Por último, los beneficios que se pretenden conseguir en un mantenimiento centrado en fiabilidad, en cuanto a los riesgos se refiere, son:

- Mayor aseguramiento de la integridad de la seguridad y entorno.
- Análisis de fallos ocultos y sus causas, que no suelen revisarse en mantenimientos rutinarios.
- Reducción de la probabilidad de fallos múltiples.
- Reducción de riesgos asociados a las tareas rutinarias.

#### **4.4 Proceso de implantación del RCM**

El proceso de implantación del RCM tiene diversas etapas como se puede apreciar en la Figura 3y que se explicarán en los siguientes subapartados.

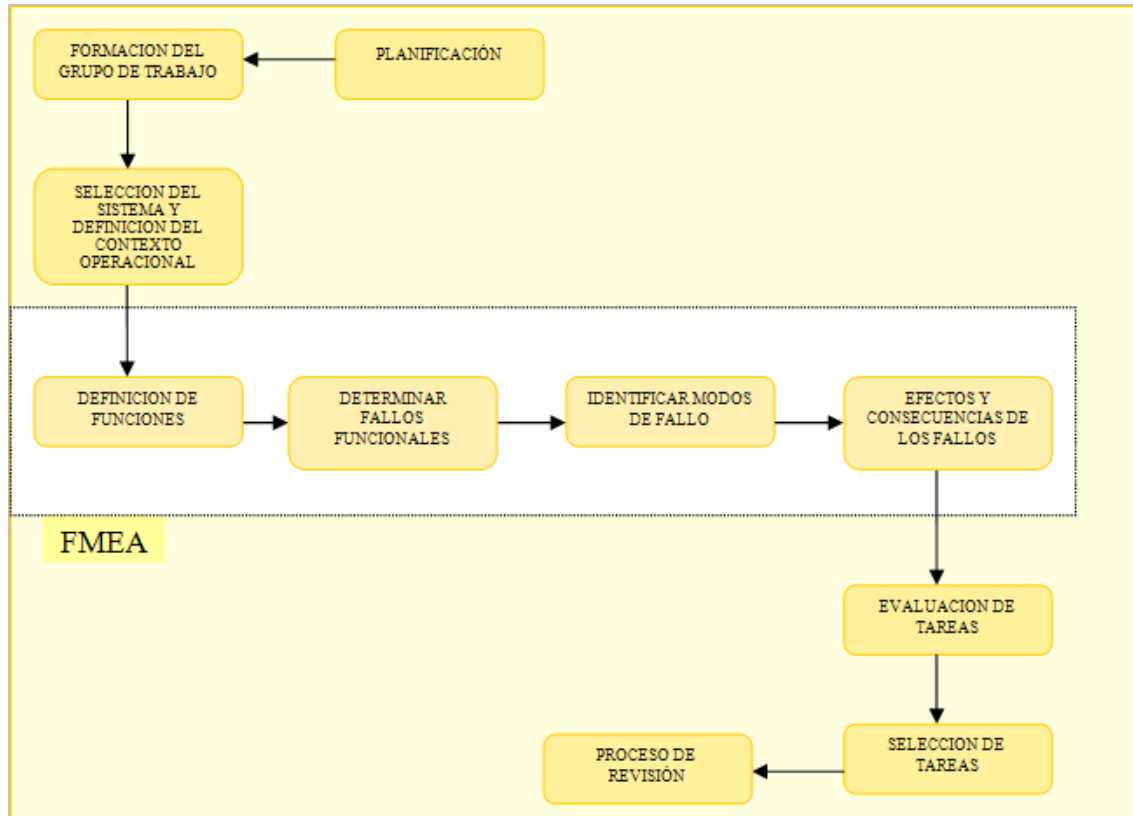


Figura 3: Proceso de implantación de RCM [2]

#### 4.4.1 Planificación

La implantación del RCM debe enmarcarse dentro de una estrategia previa general por parte de la empresa que quiera implementarla. Esto es debido al cambio filosófico que supone, por los recursos y el tiempo requerido para ello, por la necesidad de definir alternativas a menudo difíciles de seleccionar, por los importantes recursos humanos que se precisa y la formación requerida, que es lenta y cara.

La elección de un líder adecuado que motive al grupo, proporcione una participación adecuada al personal de operación, de ingeniería y supervisión, que dinamice las reuniones, haga corresponsabilizarse a todos en las decisiones tomadas, simplifique y concrete los resultados de los debates obtenidos es totalmente fundamental.[1]

Otro aspecto importante es el de asegurarse que el contexto operacional sea claramente entendido por todos los participantes y que los objetivos empresariales que se persiguen con la implantación del RCM son, igualmente, entendidos y compartidos por todos.

#### 4.4.2 Formación del grupo de trabajo

El éxito del proceso dependerá básicamente de la composición y comportamiento del grupo natural de trabajo, el cual se encargará de dar respuesta a las siete preguntas básicas del RCM.

Un Grupo Natural de Trabajo se define, dentro del contexto del RCM, como un conjunto de personas de diferentes funciones de la organización que trabajan juntas, durante un periodo de tiempo determinado, en un clima de potenciación de energía, para analizar problemas comunes de los distintos departamentos, apuntando al logro de un objetivo común.

Las características de los Grupos Naturales de Trabajo[3] [5] son:

- Alineación: Cada miembro está comprometido con los acuerdos del grupo. Esto demanda que la misión y visión sea compartidas por todos. En este sentido, la tendencia es sacarle provecho a los desacuerdos y conflictos para integrar las aportaciones de los miembros a fin de lograr soluciones efectivas.
- Coordinación: Esta característica implica que cada miembro del grupo, teniendo roles y responsabilidades claras, se apropia de los compromisos del equipo como si fueran las suyas individuales. De esta forma, el trabajo individual se orienta al desempeño común del grupo. Por lo que, el liderazgo, la gerencia y la instrucción deben ser habilidades de todos los miembros.
- Comprensión: La comprensión es un compromiso compartido. Esto requiere habilidad para distinguir entre "puntos de vista", "interpretaciones" y "hechos", para así divulgar las propias opiniones, ayudando a los otros a comprenderlas, y considerar otras diferentes. Cualquier miembro del grupo conoce los procesos de trabajo y los resultados del grupo. Esto significa que los objetivos, metas e hitos son claros y compartidos.
- Respeto: Sentir verdadero aprecio por el otro. Desarrollar y mejorar continuamente la habilidad de ver las cosas, ponerse en lugar del otro pero sin perder la perspectiva de la objetividad de la realidad operacional. Preguntarse siempre quién necesita participar en esta reunión y/o decisión, y luego, preguntar a quién es necesario informar respecto a los resultados.
- Confianza: Tener confianza en que los demás van a desempeñar sus responsabilidades de manera óptima. Cada miembro del grupo buscará la información requerida para la

toma de decisiones, consolidando la actividad individual, para modelar este clima de confianza.

Los integrantes del grupo de trabajo se pueden apreciar en la Figura 4:

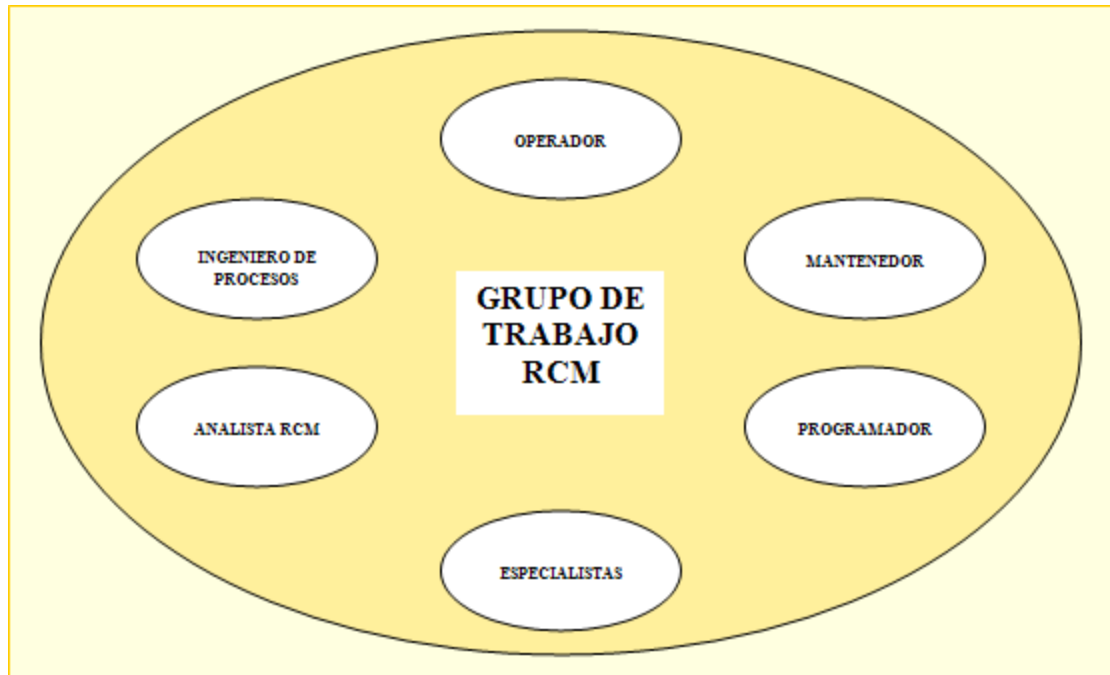


Figura 4: Integrantes del grupo de trabajo RCM [2]

#### 4.4.3 Selección del sistema y definición del contexto operacional

En primer lugar hay que escoger un sistema, equipo, prototipo o área piloto. Es conveniente seleccionar un área que sea prioritaria para la empresa, bien por su conflictividad, por su baja disponibilidad, por los costes en que incurre la empresa para llevar a cabo su mantenimiento ordinario, etc. por el hecho de alcanzar resultados con mayores posibilidades de éxito.

Una vez que se ha seleccionado el área piloto y se conoce, de forma general, la importancia de cada una de las áreas de la organización, es necesario que los grupos de trabajo RCM estudien cual debería ser el nivel de detalle (componente, equipo, sistema, planta o unidad) que se requiere para realizar el análisis de los modos y efectos de fallos, y si deberían

analizarse todos los elementos pertenecientes a ese nivel de detalle, o si no es necesario analizarlos todos, cómo seleccionarlos y cómo asignar la prioridad para comenzar el análisis.

Para entender lo que significa un nivel de detalle, es necesario que los grupos de trabajo confirmen o definan los distintos niveles de estructura que presenta un determinado sistema. Este nivel de detalle se refiere específicamente al grado de división existente en el sistema a analizar: plantas, sistemas, equipos y componentes son ejemplos de división de una determinada estructura. A continuación se definen algunos términos:

- **Componente:** representa el más bajo nivel de detalle al cual un sistema puede ser desensamblado sin que sea dañado o destruido. Engranajes, bolas de cojinetes, ejes, resistencias, chips son algunos ejemplos de componentes. El tamaño no es el criterio a considerar para establecer que elemento constituye un componente de un determinado equipo.
- **Equipo:** nivel de detalle constituido por un grupo o colección de componentes ubicados dentro de un paquete identificable, el cual cumple al menos una función de relevancia como elemento independiente. Válvulas, motores eléctricos, bombas, compresores, turbinas son ejemplos típicos de equipos.
- **Sistema:** nivel de detalle constituido por un grupo lógico de equipos los cuales cumplen una serie de funciones requeridas por una planta. La mayoría de los sistemas están agrupados en función de los procesos más importantes de una planta. Por lo general, las plantas están compuestas por varios sistemas mayores tales como: generación de vapor, tratamiento de aguas, compresión, generación de aire, sistema contraincendios, inundación, etc.
- **Planta:** nivel de detalle constituido por un grupo lógico de sistemas que funcionan en conjunto para proveer un servicio, por ejemplo, la planta propulsora o la planta eléctrica.
- **Unidad:** nivel de detalle constituido por un grupo lógico de plantas que funcionan en conjunto para facilitar la ejecución de una misión. Un ejemplo de unidad es un buque.

En esta parte del proceso es recomendable que los grupos de trabajo realicen un esquema donde se represente el nivel de detalle al cual se realizará el análisis. Los grupos de trabajo RCM deben decidir qué sistemas con sus respectivos equipos deben ser analizados y en qué orden. Para tomar dicha decisión es necesario identificar todos los sistemas existentes con sus

componentes en la unidad seleccionada y jerarquizar, de acuerdo a importancia y criticidad, cada uno de estos sistemas con sus respectivos equipos.

Uno de los métodos para jerarquizar es el método de evaluación de criticidad basada en el concepto de riesgo. Este método nos permite jerarquizar sistemas, instalaciones y equipos, en función de su impacto global, con el fin de optimizar el proceso de asignación de recursos (económicos, humanos y técnicos). El término "crítico" y la definición de criticidad pueden tener diferentes interpretaciones y van a depender del objetivo que se está tratando de jerarquizar. Desde esta óptica existe una gran diversidad de herramientas de criticidad, según las oportunidades y las necesidades existentes. La metodología propuesta es una herramienta de priorización bastante sencilla que genera resultados semicuantitativos basados en la teoría del riesgo[4] [6]:

$$\text{Riesgo} = \text{Frecuencia} \times \text{Consecuencia}$$

$$\text{Frecuencia} = \text{Nº de fallos en un tiempo determinado}$$

$$\begin{aligned} \text{Consecuencia} = & ((\text{Impacto Operacional} \times \text{Flexibilidad}) + \text{Costes Mantenimiento} \\ & + \text{Impacto en seguridad y medio ambiente}) \end{aligned}$$

Estos factores son evaluados en reuniones de trabajo con la participación de las distintas personas involucradas en el contexto operacional (operaciones, mantenimiento, procesos, seguridad y ambiente). Una vez logrado un consenso, cada uno de los valores de los factores se introducen en la formula de criticidad total y se obtiene el valor global de criticidad. Para obtener el nivel de criticidad de cada sistema se toman los valores totales individuales de cada uno de los factores principales (frecuencia y consecuencias) y se ubican en una matriz de criticidad (valor de consecuencias en el eje X y valor de frecuencia en el eje Y). Según el sector en el que se aplique, los niveles de riesgo pueden cambiar. En el apartado 6. *Aplicación del análisis RCM a la instalación* se mostrará y explicará la matriz de criticidad utilizada en este proyecto.

Por último, se necesita recopilar cierta información para definir el contexto operacional. Dicha información es la siguiente:

- Descripción de la función operativa.
- Medio donde se desarrolla la operación y su influencia.
- Disponibilidad de los insumos requeridos (combustible, aire, etc.).

- Alarmas, monitorización de primera línea.
- Políticas de repuestos, recursos y logística.
- Esquemas del sistema y/o diagramas de bloque.
- Manuales de Diseño y Operación de los Sistemas. Estos proveerán información de la función esperada de los sistemas, como se relacionan con otros sistemas y que límites operacionales y reglas básicas son utilizadas.

#### **4.4.4 AMEF: Análisis de los modos y efectos de fallo**

El Análisis de los Modos y Efectos de Fallos (AMEF) o FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) en inglés, constituye la herramienta principal del RCM para la optimización de la gestión de mantenimiento en una organización. El AMEF es un método sistemático que permite identificar los problemas antes de que estos ocurran y puedan afectar o impactar a los procesos y productos, bajo un contexto operacional determinado. Hay que tener presente que la realización del AMEF constituye la parte más importante del proceso de implantación del RCM, ya que, a partir del análisis realizado por los grupos de trabajo RCM a los distintos activos en su contexto operacional, se obtendrá la información necesaria para poder prevenir las consecuencias o efectos de los posibles fallos y realizar la selección adecuada de actividades de mantenimiento, las cuales actuarán sobre cada modo de fallo y sus posibles consecuencias.

Por lo expresado anteriormente, se deduce que el objetivo básico del AMEF es encontrar todas las formas o modos en los cuales puede fallar un activo dentro de un proceso e identificar las posibles consecuencias o efectos de los fallos en función de tres criterios básicos para el RCM: seguridad humana, ambiente y operaciones (producción). Para poder cumplir con este objetivo, los grupos de trabajo RCM deben realizar el AMEF siguiendo la siguiente secuencia:

- Explicar las funciones de los activos del área seleccionada.
- Definir los fallos funcionales asociadas a cada función del activo.
- Definir los modos de fallo asociados a cada fallo funcional.
- Establecer los efectos y las consecuencias asociadas a cada modo de fallo.

#### ***4.4.4.1 Funciones de los activos***

En esta parte del proceso de implantación del RCM, el grupo de trabajo debe comprender que el objetivo básico del mantenimiento es preservar los activos en un estado en el que estos puedan cumplir con sus funciones básicas. Esto significa que los requerimientos de mantenimiento de cualquier activo podrán ser determinados si sus funciones están claramente definidas y comprendidas. Para poder cumplir con esta fase del proceso de implantación del RCM, el grupo de trabajo deberá definir la función y diferenciar los distintos tipos de funciones según el RCM.

#### **Definición de función y explicación de los diferentes tipos de funciones**

El RCM define el término función como el propósito o la misión de un activo en un contexto operacional específico (cada activo puede tener más de una función en el contexto operacional). Para decidir cuando un activo no está trabajando satisfactoriamente, es necesario definir primeramente qué es lo que el activo debe hacer para trabajar apropiadamente, por lo cual, uno de los aspectos importantes dentro del AMEF para el grupo de trabajo RCM, consiste en definir adecuadamente la función o las funciones asociadas a cada activo en su contexto operacional. Hay que tener presente que cada activo usualmente tiene más de una función, para el RCM las funciones de un activo pueden ser divididas en cinco categorías: funciones primarias, secundarias, de protección, de control y subsidiarias.

#### **Funciones primarias**

Cada activo es puesto en servicio para cumplir eficientemente una función o varias funciones específicas, las cuales se conocen como funciones primarias y constituyen la razón de ser del activo. Este tipo de funciones son de especial interés para el desarrollo del RCM. La función primaria de un activo está usualmente definida por el propio nombre del activo. Por ejemplo, la función primaria de una bomba es bombear algún determinado fluido. Es importante aclarar que las funciones primarias de un activo podrán ser definidas a partir de la descripción de sus salidas. La descripción de cualquier función siempre contendrá claramente definidos los estándares a los cuales el activo será operado y mantenido. Estos estándares serán fijados por las especificaciones de las salidas.



### Funciones secundarias

En adición a las funciones primarias, la mayoría de los activos tiene un número significativo de funciones secundarias. Estas son usualmente menos obvias que las funciones primarias, pero las consecuencias que podrían generar sus fallos pueden ser más serias que las consecuencias originadas por las fallos de una función primaria, hecho por el cual se justifica el invertir gran cantidad de tiempo y esfuerzo para su análisis con el fin de preservar el buen funcionamiento de este tipo de funciones.

Las funciones secundarias son aquellas otras funciones que el activo está en capacidad de cumplir además de las funciones primarias. Las funciones secundarias típicas incluyen:

- **Contención:** la mayoría de los activos cuyas funciones primarias son transferir material de cualquier tipo (especialmente fluidos) tienen que contener a su vez a estos materiales. Esto incluye a bombas, tuberías, convertidores, sistemas neumáticos e hidráulicos. Esta función debe ser registrada de forma que se asegure de que sus fallos asociados (escapes, derrames, grietas) sean tenidas en cuenta.
- **Soporte:** algunos activos tienen una estructural función secundaria. Por ejemplo, la función primaria de una pared de un edificio será la de proteger a las personas y equipos de las condiciones climatológicas, pero al mismo tiempo debe soportar el techo y aguantar el peso de las distintas estructuras que conforman la pared (funciones secundarias).
- **Apariencia:** la apariencia de algunos activos envuelve específicas funciones secundarias. Por ejemplo, la función primaria de la pintura en la mayoría de los equipos industriales es protegerlos de la corrosión, por otra parte, una pintura de color brillante puede ser usada para mejorar la visibilidad del mismo, por razones de seguridad (especialmente en el caso de equipos móviles).
- **Separación y Seguridad:** para evitar la mezcla de fluidos y seguridad, en la mayoría de los casos, las funciones secundarias de los activos se relacionan con los factores de seguridad e higiene. Es decir, que los activos deben ser capaces de operar de forma segura y limpia.

### Funciones de protección

En la actualidad, los activos a mantener tienden a ser más complejos, lo que hace que el número de caminos por los cuales pueden fallar estos activos se incremente de forma exponencial, trayendo consigo un crecimiento en la variedad y severidad de las consecuencias de fallos. Para tratar de eliminar (o al menos reducir) estas consecuencias de daños, se ha incrementado el uso de equipos de protección con funciones de protección en los activos a mantener.

Las funciones de los equipos de protección de un activo sólo reaccionan cuando algo perjudicial está ocurriendo, haciendo, en la mayoría de los casos, que el activo deje de cumplir con sus funciones principales. De forma general, los equipos de protección cumplen con las siguientes funciones de protección:

- Llamar la atención de los operadores de condiciones anormales de funcionamiento, por medio de luces de seguridad, alarmas acústicas y equipos que responden a los efectos de los fallos. Los efectos de fallos son monitorizados por una gran variedad de equipos: indicadores de nivel, celdas de carga, protectores de sobrecarga y sobrevelocidad, sensores de vibración, indicadores de temperatura o presión, etc.
- Apagar los equipos cuando sucede el fallo. Para esto se utilizan también las señales emitidas por los mismos equipos mencionados en el párrafo anterior, pero a distintos niveles (niveles de shutdown / apagado automático).
- Eliminar o descubrir condiciones anormales, las cuales podrían generar fallos cuyos efectos causarían daños bastante serios (equipos contra incendios, válvulas de seguridad, discos de ruptura, equipo de emergencia médica, etc.).

En la mayoría de los casos, la finalidad de los equipos de protección será, básicamente, proteger, en primer lugar, al recurso humano de los posibles efectos de los fallos y, en segundo lugar, a los activos (usualmente ambos casos). Algunas veces las funciones de estos equipos son evidentes y en otros casos sus funciones son ocultas, como se explicará más adelante en este proyecto. Los equipos de protección deben asegurar que las consecuencias de los fallos de las funciones protegidas en un determinado activo sean mucho menos serias (impactantes) que si no estuviesen estos equipos de protección.

Para el mantenimiento de los equipos de protección hay que tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Que los equipos de protección usualmente necesitan más rutinas de mantenimiento que los equipos que están protegiendo.
- Que no se pueden considerar los requerimientos de mantenimiento de una función de protección sin considerar los requerimientos de mantenimiento del equipo de protección.

De esta forma, sólo es posible considerar los requerimientos de mantenimiento de los equipos de protección si se conocen y comprenden sus funciones de protección, por lo cual, es necesario registrar las funciones de todos los equipos de protección que constituyen el activo a analizar.

Como punto final con respecto a los equipos de protección, es necesario comentar que la mayoría de los equipos de protección actúan por excepción, es decir, cuando algo dañino o perjudicial está ocurriendo. Por dicha razón es importante describir correctamente las funciones de los equipos de protección.

#### Funciones de control

Al igual que los equipos de protección que cumplen funciones de protección existen también dispositivos que cumplen funciones de control. El patrón de funcionamiento de los equipos de control consiste en tomar mediciones con dispositivos especiales, los cuales se encargan de captar señales (temperatura, presión, flujo, cantidad de compuesto, vibración, etc.) que serán traducidas en valores específicos y comparadas con rangos normales de operación previamente establecidos, permitiendo, de esta forma, controlar y vigilar el buen funcionamiento de los distintos procesos.

Muchos de estos equipos de control están asociados a equipos de protección ya que sus funciones en la mayoría de los casos activan las funciones de los equipos de protección, por lo que resulta común que las funciones de los equipos de control se confundan o mezclen con las funciones de los equipos de protección.

Los equipos de control comúnmente usados para indicar variables tales como presión, temperatura, velocidad, tasa de flujo y niveles de fluido, dentro de un rango específico de operaciones previamente especificado son:

- Circuitos de control de volumen.
- Válvulas de control de presión.
- Controladores de vibraciones.
- Controladores de velocidad.
- Sensores de presión, flujo y temperatura.

#### Funciones subsidiarias

Funciones subsidiarias ocurren cuando un activo posee equipos adicionales ajustados a un proceso adicional, diferente del proceso principal. Las funciones subsidiarias de estos equipos especiales son descritas por su propósito o salida particular. Ejemplos típicos de equipos que cumplen funciones subsidiarias son:

- Agitadores: su función es proveer un movimiento de agitación para la mezcla de las partículas que se encuentran suspendidas en una solución determinada.
- Ventiladores de motor: su función es proveer un flujo de aire frío a través del motor para prevenir el sobrecalentamiento.
- Válvulas de aislamiento: su función es aislar secciones de tuberías.

#### ***4.4.4.2 Definir los fallos funcionales asociados a cada función del activo***

En la sección anterior se explicó cómo cada activo cumple una función o funciones específicas en un contexto operacional dado. El próximo paso que debe ser cubierto por el grupo de trabajo es determinar cómo dejan de cumplir los activos sus funciones. La pérdida de una función es conocida por el RCM como un fallo funcional.

Para la comprensión de esta fase del proceso de implantación, el grupo de trabajo RCM deberá tener conocimiento en relación a los siguientes aspectos:

- El concepto de fallo funcional.

- Las implicaciones que trae consigo el hecho de que cada función puede tener más de una fallo funcional.

### **Definición de fallo funcional**

Un fallo funcional es definido como una ocurrencia no previsible que no permite que el activo alcance el estándar de ejecución esperado, en el contexto operacional en el cual se desempeña y como consecuencia, el activo no pueda cumplir con su función o la cumpla de forma ineficiente[5] [7].

El nivel de insatisfacción producido por causa de un fallo funcional dependerá básicamente de las consecuencias que pueda generar la aparición del mismo dentro del contexto operacional.

### **Diferentes fallos funcionales asociados a una función específica**

El grupo de trabajo RCM debe ser consciente de que cada función específica puede tener más de un fallo funcional. Los diferentes fallos funcionales pueden incidir sobre una función de forma parcial o total. La pérdida total de una función ocurre cuando un activo se detiene por completo de forma inesperada. La pérdida parcial de una función sucede cuando el activo opera de forma ineficiente o fuera de los límites específicos tolerados. Casi siempre la pérdida parcial de la función es causada por distintos modos de fallo (causa raíz del fallo).

Un factor predominante, que la gestión de mantenimiento debe tener en cuenta, es la calidad que se espera del producto. Otro aspecto importante, a considerar en este punto, es el referido a los fallos funcionales de activos idénticos. En el contexto operacional es común observar como idénticos activos pueden tener diferentes funciones en diferentes situaciones, por lo cual, sus fallos funcionales pueden diferir en distintas situaciones. Lo importante de este aspecto es que el grupo de trabajo RCM entienda que, la definición precisa de fallo funcional para un activo dependerá en gran parte del contexto operacional donde se desenvuelva el mismo y que activos idénticos pueden sufrir diferentes fallos funcionales si el contexto operacional es diferente.

#### ***4.4.4.3 Definir los modos de fallo asociados a cada fallo funcional***

Las secciones anteriores se han referido a la definición de las funciones de los activos así como a sus fallos funcionales. Las funciones de los activos en el contexto operacional y los fallos funcionales dictarán el nivel al cual es requerido el mantenimiento, es decir, la definición clara de estos conceptos permitirá establecer los objetivos del mantenimiento con respecto a los activos, en su actual contexto operacional.

Los modos de fallo son las causas físicas que originan la aparición de los fallos funcionales. Las actividades de prevención, anticipación o corrección de fallos funcionales, según el RCM, deben estar orientadas a atacar modos de fallo específicos. Esta afirmación, constituye una de las mayores diferencias entre el RCM y la forma tradicional de gestionar el mantenimiento, es decir, para el RCM las actividades de mantenimiento, generadas a partir del análisis realizado por el grupo de trabajo RCM, atacarán específicamente a cada uno de los modos de fallo asociados a cada fallo funcional (cada fallo funcional puede tener más de un modo de fallo).

La identificación correcta, por parte del grupo de trabajo RCM, de los modos de fallo será el factor básico para la selección adecuada de las actividades de mantenimiento.

#### **Registro de los modos de fallo**

El grupo de trabajo RCM debe tener presente que no es posible, ni deseable, que sean registrados todos los modos de fallo posibles que pueden causar el mismo fallo funcional. El registro de los modos de fallo deberá excluir aquellos cuya probabilidad de ocurrencia sea sumamente baja. Para el registro de los modos de fallo se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Modos de fallo asociados a un activo ocurridos anteriormente en un contexto operacional similar o parecido.
- Modos de fallo asociados a un activo que, sin haber ocurrido aún en el actual contexto operacional o en uno similar, tienen una probabilidad de fallo razonable (identificada estadísticamente).
- Modos de fallo asociados a un activo cuyos efectos sean severos para la seguridad humana, el ambiente o las operaciones.

En el proceso de análisis de los modos de fallo, el grupo de trabajo RCM deberá buscar información relacionada a la ocurrencia de los modos de fallo a partir de:

- Los operadores y mantenedores que hayan tenido una larga experiencia con los activos a analizar.
- Los fabricantes y vendedores de equipos.
- Otros usuarios de los mismos equipos.
- Los registros técnicos existentes de cada activo.
- La base de datos existente en la organización.

#### *4.4.4.4 Establecer los efectos o las consecuencias de cada uno de los modos de fallo*

El objetivo principal del grupo de trabajo RCM, en esta parte del proceso, consiste en determinar lo que sucederá en el contexto operacional si ocurriese cada modo de fallo. La identificación de los efectos de los fallos deberá incluir toda la información necesaria que ayude a soportar la evaluación de las consecuencias de los fallos.

Para identificar y describir de forma precisa los efectos producidos por cada modo de fallo, hay que saber cómo se evidencia (si puede ser evidente) que ha ocurrido un modo de fallo. Los posibles efectos que provocará cada modo de fallo deberán ser analizados por el grupo de trabajo RCM, los cuales se encargarán de decidir si la ocurrencia de cada modo de fallo será evidente o no para el personal que trabaja dentro del contexto operacional donde se producirán los modos de fallo.

Por otro lado, hay que conocer cómo podría afectar la ocurrencia de cada modo de fallo a la seguridad humana o al ambiente. Si existe la posibilidad de que alguna persona pueda morir o pueda ser herida, o de que alguna normativa ambiental pueda ser incumplida como consecuencia de la ocurrencia de un modo de fallo.

Actualmente, los diseños modernos de las plantas industriales y de sus activos, tienden a disminuir al máximo la ocurrencia de este tipo de modos de fallo, con la inclusión de nuevas tecnologías específicamente en el área de equipos de control, protección y seguridad. Los modos de fallo que afectan a la seguridad humana o al ambiente generalmente ocurren por:

- Actos imprudentes (incumplimiento de las normas de seguridad establecidas).

- Mala operación de los equipos.
- Escapes y derrames de sustancias químicas: gases, líquidos o sólidos.
- Caídas de objetos.
- Descargas eléctricas.
- Presiones excesivas de trabajo (especialmente en tanques de presión, tuberías y sistemas hidráulicos).

Por último, hay que plantearse cómo afectaría la ocurrencia de cada modo de fallo a la producción y a las operaciones. Si la ocurrencia de un determinado modo de fallo afecta de forma directa a la producción o a las operaciones, el grupo de trabajo deberá describir de forma clara y específica el impacto que traerá consigo la ocurrencia del modo de fallo. Este tipo de modo de fallo generalmente actúa de la siguiente forma:

- Parando completamente los procesos.
- Reduciendo la tasa de producción.
- Reduciendo la calidad del producto, ya sea por la disminución de la tasa de producción o por el incremento de los defectos.
- Aumentado los costes del proceso como consecuencia, básicamente, de la aparición de modos de fallo no previstos.

Si la aparición de estos modos de fallo no es evitada, se necesitará gran cantidad de tiempo y esfuerzo para corregir los mismos, lo cual afectará de forma negativa a la organización, ya que reparar y corregir los efectos provocados por los modos de fallo consume recursos, los cuales podrían ser usados en cualquier otra área de la organización de mejor manera y de forma más eficiente.

La naturaleza y la severidad de las consecuencias de los modos de fallo, según el RCM, deben ser los aspectos que gobiernen la selección de las actividades de mantenimiento a ejecutar sobre los activos a mantener en el contexto operacional claramente identificado. En el caso que las consecuencias generadas por los modos de fallo sean muy serias, se deberán considerar actividades para evitar la aparición de estos modos de fallo, o actividades que al menos permitan anticipar a tiempo la aparición del modo de fallo y de esta forma, se pueda



reducir o eliminar las posibles consecuencias del mismo. Para el RCM, lo mencionado anteriormente se aplica irrevocablemente cuando la consecuencia del modo de fallo pueda matar o herir a alguna persona, cuando exista la posibilidad de que el modo de fallo pueda afectar de forma seria al ambiente, o cuando la incidencia del modo de fallo sobre la producción o las operaciones impacte de forma excesiva en el aspecto económico (grandes pérdidas económicas). Por otro lado, si las consecuencias de los modos de fallo son triviales, es posible que se pueda decidir no realizar ninguna actividad de prevención y simplemente realizar una acción correctiva en el momento que aparezca el modo de fallo.

Esto sugiere que las consecuencias de los fallos son más importantes que sus características técnicas, por lo cual, según el RCM, la prevención de los fallos no consiste sólo en prevenir el fallo en sí mismo, sino que lo más importante consiste en reducir o eliminar las consecuencias que podrían generar los mismos dentro del contexto operacional.

El proceso de prevención de los modos de fallo tiene mucho más que ver con la eliminación o reducción de las consecuencias de los modos de fallo, que con la prevención misma de los modos de fallo [7].

El párrafo anterior permite inferir que, para el RCM, las actividades de mantenimiento óptimas para prevenir los modos de fallo serán sólo aquellas que impidan o minimicen las consecuencias de los modos de fallo.

#### **Categoría de las consecuencias de los modos de fallo según el RCM**

Con el fin de poder decidir cuál es la mejor actividad de mantenimiento a ejecutar, es necesario que el grupo de trabajo RCM tenga claramente definido los aspectos relacionados con las consecuencias de los modos de fallo. El impacto que cualquier modo de fallo puede tener sobre la organización dependerá, básicamente, de:

- Del contexto operacional donde trabaje el activo.
- De los efectos o consecuencias físicas que puede provocar la ocurrencia de cada modo de fallo.

La combinación de los dos factores mencionados hace que cada modo de fallo tenga una forma característica de impactar a la seguridad, al ambiente o a las operaciones. Para poder

entender esta parte, la filosofía del RCM ha clasificado las consecuencias de los modos de fallo en cuatro categorías, como se puede apreciar en la Figura 5.

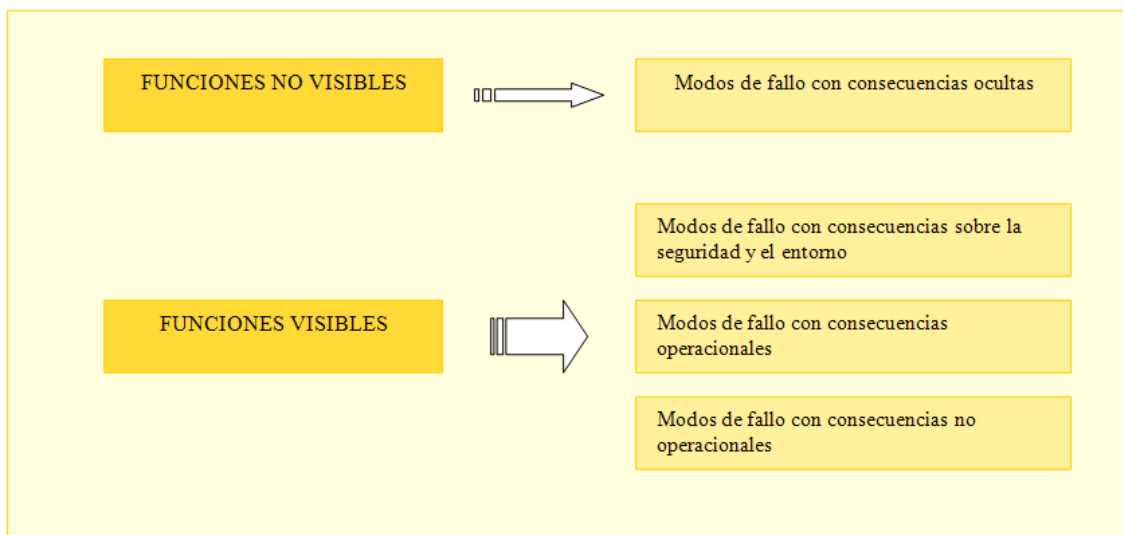


Figura 5: Categorías de las consecuencias de los modos de fallo [2]

#### Modos de fallo con consecuencias ocultas

Las consecuencias de este tipo de modo de fallos se generan a partir de las funciones ocultas, o no evidentes, que presentan algunos activos en el contexto operacional (especialmente los equipos de seguridad, protección, reserva, redundantes y control). La aparición de modos de fallo con consecuencias ocultas no será evidente dentro del desarrollo normal de las operaciones de un determinado sistema.

Los modos de fallo ocultos están asociados a las funciones que no son evidentes, por lo cual, el grupo de trabajo deberá tener especial cuidado a la hora de analizar este tipo de modos de fallo. Usualmente, los modos de fallo de este tipo ocurren en los equipos de protección y reserva. En la actualidad, las plantas y equipos modernos están afectados por este tipo de modos de fallo, debido al incremento en la utilización de sistemas de seguridad y protección como consecuencia de las nuevas y estrictas exigencias internacionales en áreas como la seguridad humana, el ambiente, y las operaciones (calidad del producto).

### Modos de fallo con consecuencias sobre la seguridad humana y el ambiente

Las consecuencias de los modos de fallo sobre la seguridad y el ambiente surgen a partir de funciones evidentes de los activos, cuyos fallos funcionales afectarán, en primer lugar, a la seguridad humana (muertes, heridas a las personas o condiciones inseguras) y en segundo lugar, al ambiente (incumplimiento de estándares ambientales: internacionales, nacionales o regionales).

### Modos de fallo con consecuencias operacionales

Los modos de fallo que afectan a las operaciones surgen a partir de funciones evidentes, cuyos fallos funcionales afectarán de forma importante a la producción o las operaciones (cantidad de producto, calidad del producto, calidad del servicio prestado, costes de operación y costes directos de reparación).

### Modos de fallo con consecuencias no operacionales

Los modos de fallo con consecuencias no operacionales surgen a partir de funciones evidentes, cuyos fallos funcionales no afectarán de forma importante (aceptables) a la seguridad, al ambiente o las operaciones. Generalmente, este tipo de modo de fallo sólo originará consecuencias económicas (afecta sólo el coste directo de la reparación).

Si el grupo de trabajo RCM, identifica y describe claramente, bajo la metodología de análisis propuesta por el RCM, los cuatro tipos de consecuencias que los modos de fallo de los activos pueden generar en el contexto operacional, se garantiza que las implicaciones sobre la seguridad, el ambiente y las operaciones (producción) de cada modo de fallo serán tenidas en cuenta. Es decir, que las consecuencias sobre la seguridad, el ambiente y las operaciones de cada modo de fallo serán estudiadas conjuntamente, lo cual es mucho más efectivo desde el punto de vista económico que considerarlas de forma separada [6].

### **Modos de fallo ocultos en RCM**

Cada activo, en la mayoría de los casos, tiene más de una función. Cuando estos activos dejan de cumplir sus funciones (fallan) generalmente alguien se da cuenta, en cuyo caso el

fallo es clasificado como evidente. Sin embargo, algunos fallos ocurren de tal forma que nadie sabe que el activo se encuentra en ese estado hasta que algún otro fallo también ocurre, este tipo de fallos no son evidentes por sí solos, y se les conoce como fallos ocultos [5].

Un ejemplo común de fallo oculto es cuando existen dos equipos para la realización del mismo cometido, siendo uno de ellos de reserva. El hecho de que el equipo de reserva esté averiado no es evidente en circunstancias normales de funcionamiento, por lo que hasta que no falle el equipo que está en operación no es posible darse cuenta de que está dañado, por lo que no tendrá impacto directo hasta que el equipo en funcionamiento falle. La situación en la que el equipo de reserva no funciona habiendo fallado el equipo en operación es conocida con el nombre de fallo múltiple.

La aparición de los modos de fallo, asociados a las funciones ocultas de los activos no serán evidentes bajo condiciones normales de operación, en el caso de que sólo ocurran estos modos de fallo. La única consecuencia de una fallo oculto es incrementar el riesgo de un fallo múltiple.

Para este tipo de consecuencias de fallos, se debe seleccionar actividades de mantenimiento que ayuden a prevenir, o al menos reduzcan, las consecuencias que traerán consigo la aparición asociada de los fallos múltiples, esto quiere decir que el grupo de trabajo deberá enfocar el esfuerzo para tratar de prevenir los fallos ocultos en función del análisis de las posibles consecuencias de los fallos múltiples.

#### **Rutinas de Mantenimiento relacionadas con la prevención de fallos múltiples causadas por modos de fallo ocultos**

Como se definió anteriormente, los modos de fallo ocultos no son evidentes bajo condiciones normales de operación, por lo cual, estos tipos de fallos no tienen consecuencias directas, aunque si propician la aparición de fallos múltiples en un determinado contexto operacional.

Uno de los caminos que puede ayudar a minimizar los posibles efectos de un fallo múltiple es tratar de disminuir la probabilidad de ocurrencia de los fallos ocultos, chequeando periódicamente si la función oculta está trabajando correctamente. Estos chequeos son conocidos como las tareas de búsqueda de fallos ocultos.

Las tareas de búsqueda de fallos ocultos consisten en acciones de inspección de los activos con funciones ocultas a intervalos regulares de tiempo, con el fin de detectar si dichas funciones ocultas se encuentran en estado normal de operación o en estado de fallo.

La razón fundamental de este tipo de actividad de prevención es chequear si una función oculta está disponible. La aplicación de las tareas de búsqueda de fallos ocultos está orientada básicamente a equipos de protección y a componentes de activos tales como circuitos eléctricos o instrumentos de control. El chequeo que trae consigo la aplicación de estas actividades debe realizarse “in situ” bajo condiciones reales de operación, o bajo condiciones simuladas de operación.

Pueden existir situaciones donde sea imposible aplicar una tarea de búsqueda de fallos ocultos, como pueden ser:

- Cuando la función oculta de un equipo de protección no puede ser chequeada sin destruir dicho equipo (como en el caso de fusibles de protección o discos de ruptura).
- Cuando es imposible acceder al equipo con funciones ocultas (problema relacionado con el diseño).
- Donde resulte sumamente peligroso el simular las condiciones reales de operación del activo con funciones ocultas.

En otros casos resulta posible realizar el chequeo, pero la frecuencia de aplicación no es práctica, ya sea porque esta frecuencia es sumamente alta o porque es sumamente baja. Para que una tarea de búsqueda de fallos resulte aplicable debería ser capaz de disminuir la probabilidad de ocurrencia de un fallo múltiple a un nivel aceptable y debería realizarse a una frecuencia de ejecución que sea práctica.

Finalmente, cuando una tarea de búsqueda de fallos ocultos resulta ser no aplicable o no efectiva existen dos posibles acciones a ejecutar:

- Si el modo de fallo oculto puede generar un fallo múltiple que afecte a la seguridad o al ambiente, el rediseño es obligatorio.
- Si el modo de fallo oculto genera un fallo múltiple que no afecta a la seguridad o al ambiente, es recomendable no realizar ninguna actividad de mantenimiento

programada, y es posible pensar en un rediseño, si las consecuencias son económicamente muy costosas.

#### **4.4.5 Proceso de selección de las actividades de mantenimiento bajo el enfoque del RCM**

Una vez realizado el AMEF, el grupo natural de trabajo RCM deberá seleccionar el tipo de actividad de mantenimiento que ayude a prevenir la aparición de cada modo de fallo previamente identificado, a partir del árbol lógico de decisión (herramienta diseñada por el RCM, que permite seleccionar el tipo de actividad de mantenimiento más adecuada para evitar la ocurrencia de cada modo de fallo o disminuir sus posibles efectos). Después de seleccionar el tipo de actividad de mantenimiento, a partir del árbol lógico de decisión, se debe especificar la acción de mantenimiento a ejecutar asociada al tipo de actividad de mantenimiento seleccionada, con su respectiva frecuencia de ejecución, teniendo en cuenta que uno de los objetivos principales del RCM es evitar, o al menos reducir, las posibles consecuencias a la seguridad humana, al ambiente y a las operaciones que traerán consigo la aparición de los distintos modos de fallo [5].

El primer paso para seleccionar las actividades de mantenimiento consiste en identificar las consecuencias que generan los modos de fallo como muestra la Figura 6:

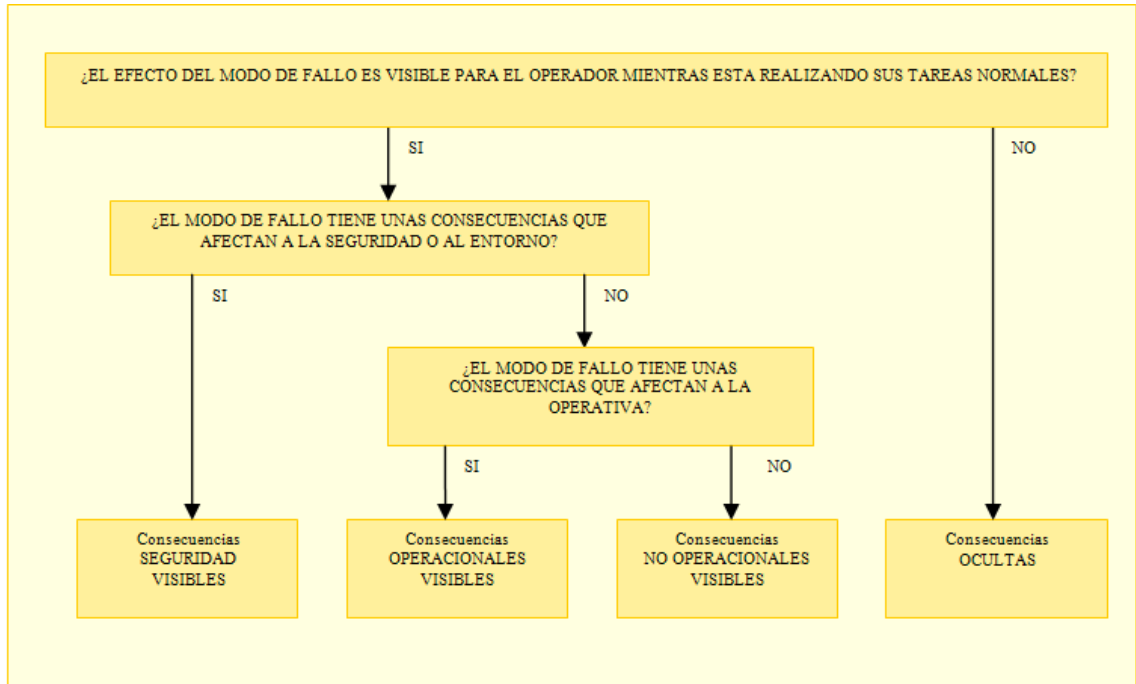


Figura 6: Evaluación de tareas RCM [2]

Una vez identificadas las consecuencias por cada modo de fallo, el grupo natural de trabajo debe identificar el tipo de actividad de mantenimiento, apoyándose en el árbol lógico de decisión del RCM como muestra la Figura 7:

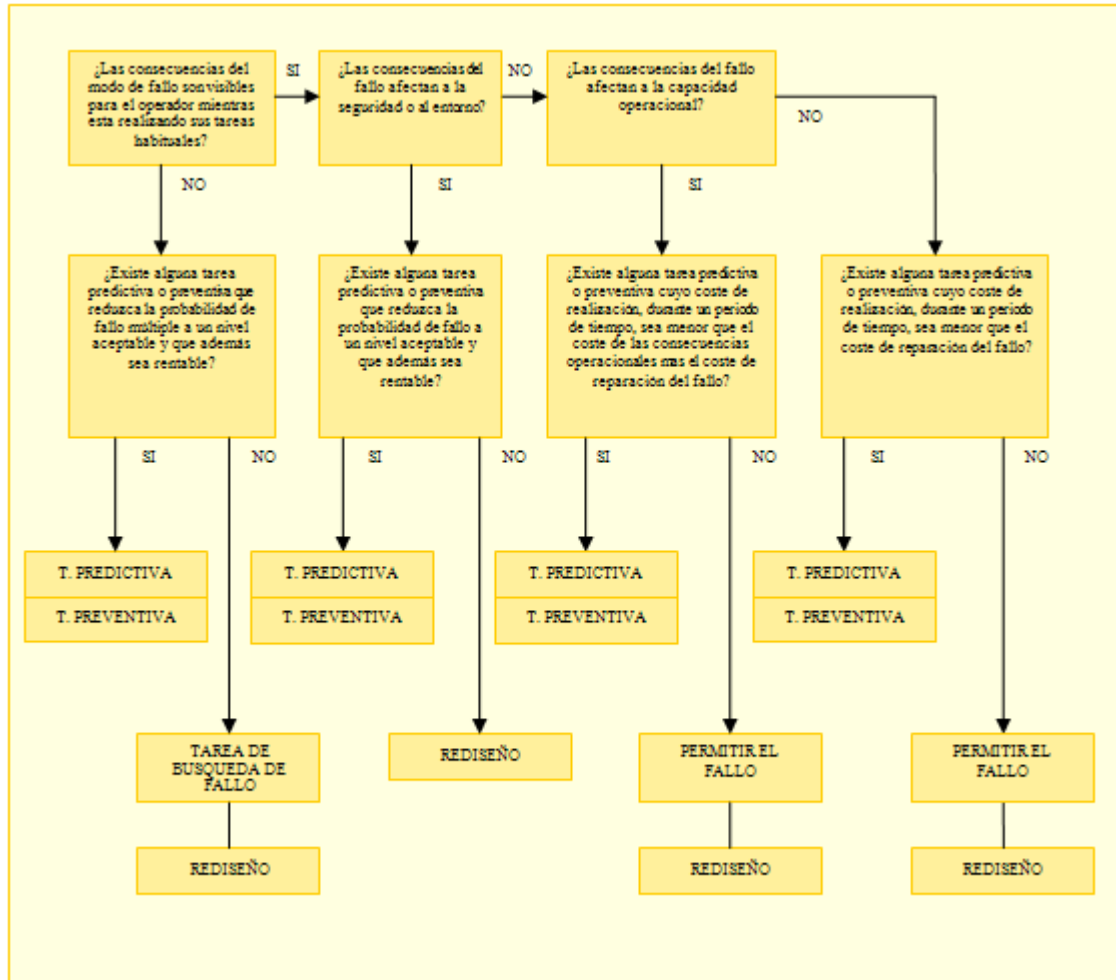


Figura 7: Selección del tipo de tarea de mantenimiento [2]

El RCM clasifica las actividades de mantenimiento a ejecutar en dos grandes grupos o tipos: las actividades predictivas/preventivas y las acciones por defecto. Estas últimas, se ejecutarán sólo en el caso de no encontrar una actividad aplicable y efectiva de mantenimiento predictivo/preventivo.

En cuanto a las acciones por defecto, están dentro de ésta: el mantenimiento correctivo, las tareas de búsqueda de fallos ocultos (ambas comentadas y explicadas) y el rediseño.

En el caso que no se consigan actividades aplicables y efectivas de predicción o prevención que ayuden a reducir los modos de fallo que afecten a la seguridad o al ambiente a un nivel aceptable, es necesario realizar un rediseño que minimice o elimine las consecuencias de los modos de fallo.



#### **4.4.6 Proceso de revisión basado en RCM**

Como se ha mencionado en los anteriores apartados, es necesario elaborar previamente un programa de actuación definiendo las metas a alcanzar, que deben estar en total consonancia con los objetivos empresariales. Una vez definidas las metas y los objetivos, se comienza con los análisis de fallos funcionales, determinando sus modos de fallo y analizando las causas y efectos. Ante cada modo de fallo y cada análisis concreto, hay que seleccionar una táctica de mantenimiento, ya sea realizar revisiones periódicas, implementar un mantenimiento predictivo o no hacer nada.

Después de haber elaborado el proceso de nueva sistemática de mantenimiento, se implanta. Posteriormente, habrá una fase de optimización (revisión), ya que habrá disfuncionalidades y errores que se corregirán cambiando el programa previo. Si los resultados se han adecuado a los objetivos marcados en un principio, la implementación habrá alcanzado su objetivo y tenido éxito [1].

#### **4.4.7 Ventajas y desventajas de la implantación de la metodología RCM**

La metodología RCM es una técnica organizativa que mejora significativamente los resultados de la empresa que la implanta. Esta metodología permitirá:

- Reducir de manera importante el coste del mantenimiento.
- Optimizar la fiabilidad operacional, maximizar la disponibilidad y/o mejorar la mantenibilidad de los sistemas.
- Asociar a cada modo de fallo una tarea de mantenimiento cuantificada.
- Integrar las tareas de mantenimiento con el contexto operacional.
- Incrementar la seguridad operacional y la protección ambiental.
- Optimizar la aplicación de las actividades de mantenimiento teniendo en cuenta la criticidad e importancia de los activos dentro del contexto operacional.
- Establecer un sistema eficiente de mantenimiento preventivo.

- Facilitar el proceso de normalización a través del establecimiento de procedimientos de trabajo y de registro.
- Mejorar la efectividad de las actividades de mantenimiento a través de una gestión más horizontal y más relacionada con el contexto operacional.
- Asignar responsabilidad del proceso a un equipo multidisciplinar de trabajo.
- Desarrollar un sistema efectivo de registro y manejo de datos.
- Crear un espíritu altamente crítico en todo el personal (operaciones-mantenimiento) frente a condiciones de fallo y averías.
- Fomentar el trabajo en grupo (convirtiéndolo en algo rutinario).
- Aumentar el conocimiento del personal tanto de operaciones como de mantenimiento con respecto a los procesos operacionales y sus efectos sobre la integridad de las instalaciones.
- Involucrar a todo el personal que tiene que ver con el mantenimiento y la conducción de los sistemas.

El RCM, como toda metodología, no sólo tiene ventajas sino que también tiene sus inconvenientes. Dichas desventajas son:

- Es un método muy basado en la experiencia de los participantes, por lo que se pueden presentar serios problemas para llevarlo a cabo internamente con equipos y sistemas nuevos.
- El éxito del proceso depende de la capacidad de liderazgo del guía y de la predisposición al cambio y motivación de los participantes, por lo que es básico analizar previamente la situación sociolaboral, el momento, etc.
- Es un proceso arduo y lento, por lo que la estrategia de implantación debe ser cuidadosa para no desmoralizar a los participantes.
- En organizaciones rígidas, la racionalización final puede desembocar en unas mínimas o nulas mejoras en cuanto a costes y disponibilidades.
- El conocimiento de nuevas tecnologías (sobre todo predictivas) es importante, pues, en su defecto, el grupo de trabajo cae con gran facilidad en volver a definir un nuevo plan sólo preventivo sistemático.

Por último, se presentan algunos puntos de interés que deben ser tenidos en cuenta a la hora de implantar RCM en una organización:

- Promover implantación del RCM dentro de un proceso global de mejora de la Fiabilidad Operacional de toda la organización, y no como una iniciativa aislada del área de mantenimiento. No se debe limitar o disminuir el campo de acción de las técnicas de optimización de Fiabilidad a herramientas únicas asociadas, en muchas oportunidades, a simples modas.
- El éxito de la implantación del RCM dependerá, fundamentalmente, del recurso humano involucrado, motivo por el cual hay que tener un especial cuidado en el proceso de selección y en la formación del personal que participará en este proceso. El proceso de selección y formación deberá ser capaz de motivar al personal, y de generar en éste el compromiso necesario para implantar las metodologías de Fiabilidad de forma eficiente.
- Evitar, al principio de un proceso de implantación del RCM, el sobrecargarse y realizar muchas aplicaciones de forma simultánea. Para esto es necesario evaluar el posible impacto de cada análisis de RCM y justificar su aplicación.

Hay que tener claro que el proceso de implantación de RCM en una organización no traerá consigo resultados inmediatos, los mismos podrán cuantificarse y evaluarse de forma segura y fiable en un periodo de tres años aproximadamente. Por lo cual este debe ser un proyecto de largo alcance y con visión de futuro.

#### 4.5 Índices básicos de gestión del mantenimiento

Para la Filosofía del RCM, el control de la gestión del mantenimiento está relacionada con tres indicadores básicos: disponibilidad, fiabilidad y mantenibilidad. A continuación se presentan los parámetros a ser utilizados en el cálculo de estos índices:

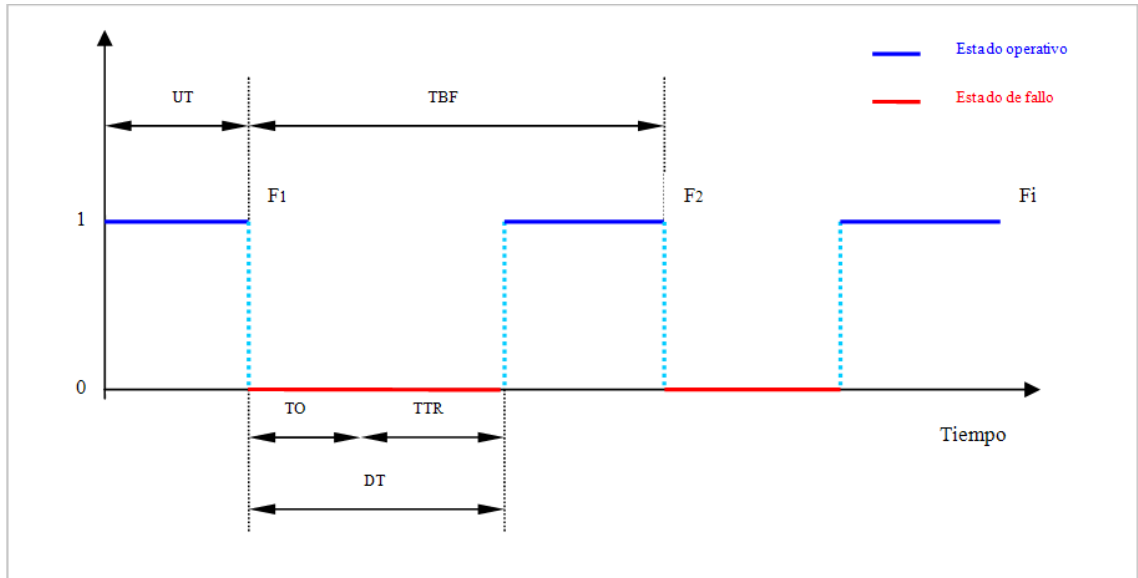


Figura 8: Distribución de fallos del equipo [2]

Donde:

1 = condición operativa del equipo.

0 = condición no operativa del equipo.

$F_i$  = fallo i-ésimo.

UT = up time o tiempo operativo entre fallos.

TBF = time between failures o tiempo entre fallos.

DT = down time o tiempo no operativo entre fallos.

TTR = time to repair o tiempo necesario para reparar.

TO = time out o tiempo fuera de control (tiempo difícil de estimar, se relaciona con la logística del mantenimiento: proveedores, transporte, retrasos, ocio).

Para un número de fallos =  $n$ :

MTBF = mean time between failures, tiempo medio entre fallos.

- $$MTBF = \sum TBF / n \text{ (ecuación 5.5.1)}$$

MUT = mean up time, tiempo medio de funcionamiento entre fallos.

- $MUT = \sum UT/n$  (ecuación 5.5.2)

MDT = mean down time, tiempo medio de indisponibilidad entre fallos.

- $MDT = \sum DT/n$  (ecuación 5.5.3)

MTTR = mean time to repair, tiempo medio para reparar.

- $MTTR = \sum TTR / n$  (ecuación 5.5.4)

MTO = mean out time, tiempo medio fuera de control.

- $MTO = \sum TO / n$  (ecuación 5.5.5)

#### 4.5.1 Disponibilidad

La disponibilidad es la probabilidad de que un equipo se encuentre en condiciones de cumplir su misión en un instante cualquiera. Relaciona, básicamente, los tiempos de reparación de los fallos (MTTR mantenibilidad) y los tiempos operativos entre fallos (MUT, depende de la tasa de fallos y de la fiabilidad).

La indisponibilidad es la proporción de tiempo que el equipo no se muestra apto para cumplir la misión.

La disponibilidad constituye el parámetro cuya información es la más representativa y útil para la gestión del mantenimiento. El cálculo de la disponibilidad relaciona a la fiabilidad y la mantenibilidad.

La disponibilidad operativa ( $A_o$ ) es similar a la inherente o de diseño, solo que tiene en cuenta el tiempo no operativo del equipo de forma total (desde que el equipo sale fuera de servicio hasta que es otra vez puesto en operación), es decir, que incluye el retraso que trae consigo la logística de las actividades de mantenimiento (compra de repuestos, transporte, tiempo de ocio no determinados, etc.). La ecuación para calcular la disponibilidad operacional ( $A_o$ ) es:

$$A_o = \frac{MUT}{MUT+MDT} \times 100\% \text{ (ecuación 5.5.1.1)}$$

Donde:

$$\text{MDT} = \text{MTTR} + \text{MTO} \text{ (ecuación 5.5.1.2)}$$

La disponibilidad operativa considera el diseño del equipo más la disponibilidad del personal de mantenimiento, las políticas y procedimientos de mantenimiento y los factores no tenidos en cuenta en el diseño de los equipos. La ecuación es utilizada cuando la gestión de mantenimiento no tiene bien definidos ni los tiempos de reparación (TTR), ni los tiempos relacionados con la logística del mantenimiento (TO), es decir, se considera el tiempo no operativo entre fallos (DT) globalmente.

#### **4.5.2 Mantenibilidad**

La mantenibilidad se define como la probabilidad de que un aparato en fallo sea restaurado completamente a su nivel operacional dentro de un periodo de tiempo dado, cuando la acción de reparación se efectúa de acuerdo con procedimientos preestablecidos [8].

La mantenibilidad se relaciona básicamente con el diseño y la complejidad del equipo, con el personal cualificado que realice el mantenimiento, con las herramientas disponibles y con los procedimientos de mantenimiento.

El parámetro fundamental para calcular la mantenibilidad lo constituye el tiempo medio de reparación de los fallos (MTTR). Cuando el MTTR de un determinado equipo es alto, se dice que el equipo tiene una baja mantenibilidad (cuanto más tiempo duren las reparaciones de los fallos asociados a un equipo, menor será su mantenibilidad). En el caso contrario, cuando el tiempo medio de reparación de los fallos de un determinado equipo sea bajo, se dice que el equipo tiene una alta mantenibilidad.

#### **4.5.3 Fiabilidad**

El comienzo histórico de la aplicación de las técnicas de fiabilidad se inicia en el año 1713 cuando Jacob Bernouilli formuló la ley de probabilidad de dos eventos independientes. Pero su arranque definitivo se inicia en 1943 (Segunda Guerra Mundial) en Peenemunde [8].

La fiabilidad se define como la probabilidad de que un equipo cumpla una misión específica (no falle) bajo condiciones de operación determinadas en un período de tiempo determinado.

La fiabilidad ( $R(t)$ ) se relaciona básicamente con la tasa de fallos (cantidad de fallos) y con el tiempo medio operativo (MUT). Si el número de fallos de un determinado equipo va en aumento o si el MUT de un equipo disminuye, la fiabilidad del mismo será menor.

$\lambda(t)$  es la tasa instantánea de fallos o probabilidad de fallo del componente en un tiempo infinitamente pequeño  $dt$  cuando en el tiempo  $t$  estaba operativo. La tasa de fallos se puede escribir, en función de la fiabilidad, de la siguiente forma [8]:

$$\lambda(t) = -\frac{\frac{d[R(t)]}{dt}}{R(t)} \quad (\text{ecuación 5.5.3.1})$$

#### 4.5.4 Patrones de fallo

Es fundamental tener claro cuál es el patrón de fallo al que se ajusta cada elemento para conseguir una óptima planificación del mantenimiento, ya que de nada sirve realizar una planificación del mantenimiento con un patrón de fallo que no corresponde con el elemento a analizar, debido a que saldrían resultados que no corresponderían en absoluto con la realidad.

En la actualidad existen diversos patrones de fallo, los cuales se muestran en la siguiente figura:

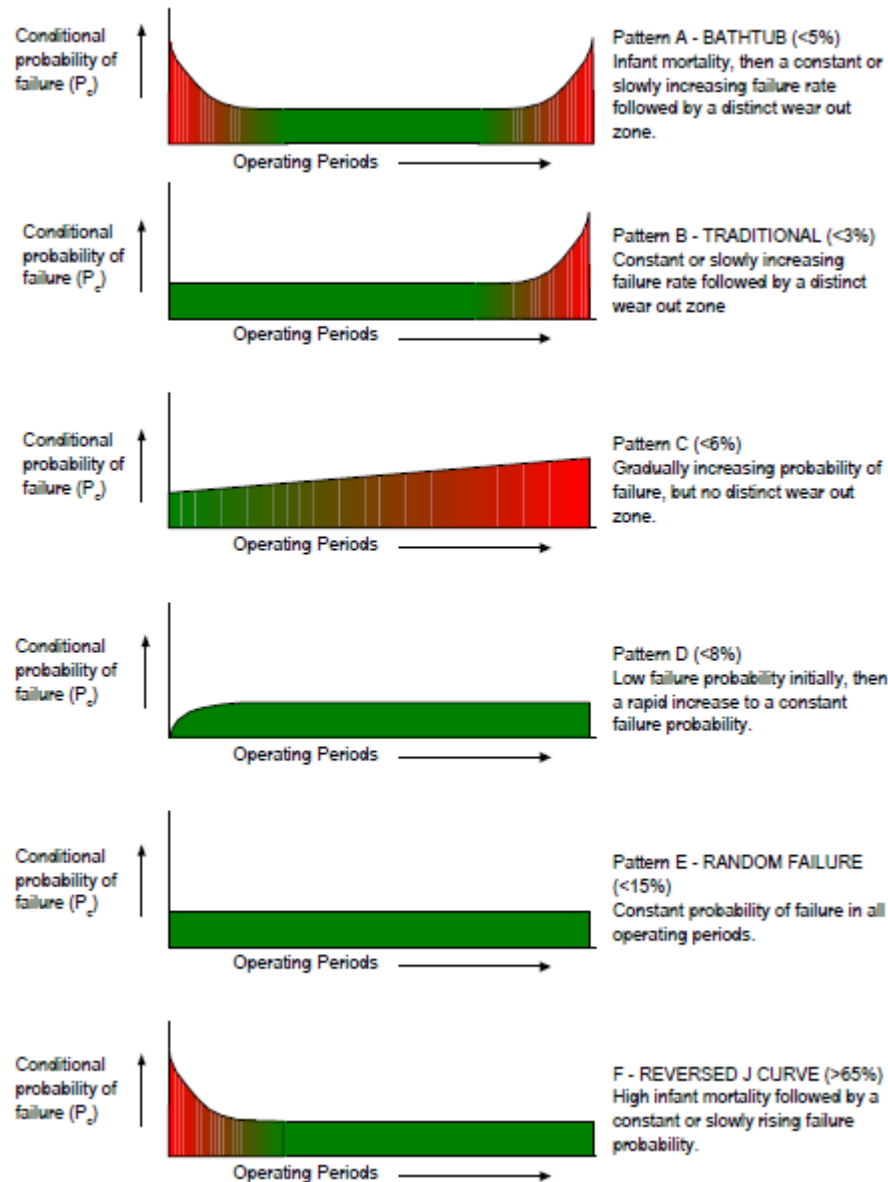


Figura 9: Patrones de fallo [9]

Se puede observar en la Figura 9 los diferentes patrones de fallo junto con la proporción de componentes que siguen los diferentes modelos de curvas de tasas de fallo. Estos modelos de curvas de tasa de fallo muestran la evolución de la tasa de fallos respecto al tiempo.

El patrón de fallo A, donde la proporción de componentes que siguen dicho patrón es menor del 5% y que se le conoce como curva de la bañera, tiene tres zonas bien diferenciadas. La primera zona es la conocida como “mortalidad infantil”, siendo el inicio de la vida útil del componente donde se producen fallos prematuros debido a componentes defectuosos, a diseños incorrectos, deficientes controles de calidad, por instalación incorrecta, por período de



rodaje mal efectuado, etc. En esta primera etapa, la tasa de fallos es relativamente alta, siendo su curva decreciente. Una vez que se han acoplado todos los elementos existe un período en que la tasa de fallos es baja, pudiéndose considerar constante, donde se producen fallos de manera aleatoria denominándose a esta etapa como la de la vida útil. Por último, se encuentra la zona de envejecimiento donde la tasa de fallos crece debido al desgaste.

El patrón B (con un porcentaje de componentes que siguen dicho patrón menor del 3%) muestra, en el inicio de la vida útil del componente, una probabilidad de fallo constante o en ligero aumento y, posteriormente, una zona de agotamiento donde la probabilidad de fallo aumenta rápidamente. Este patrón ocurre cuando a un elemento se le somete a un estrés o fatiga. La resistencia a dicho estrés se irá deteriorando hasta un punto en el cual el elemento ya no puede desarrollar el rendimiento esperado y, por tanto, falla.

El patrón C (con una proporción de componentes que siguen dicho patrón menor del 6%) muestra una probabilidad de fallo creciente de forma gradual durante todos los períodos, pero sin alcanzar un punto en el que se pueda considerar al elemento como desgastado. La fatiga es la causa más probable para que la tasa de fallos tome esta forma. El fallo por fatiga está provocado por un estrés cíclico, estando la relación entre el estrés cíclico y el fallo gobernada por la curva S-N (relación entre la amplitud media del estrés cíclico aplicado y el número de ciclos de operación), que se muestra en la siguiente figura:

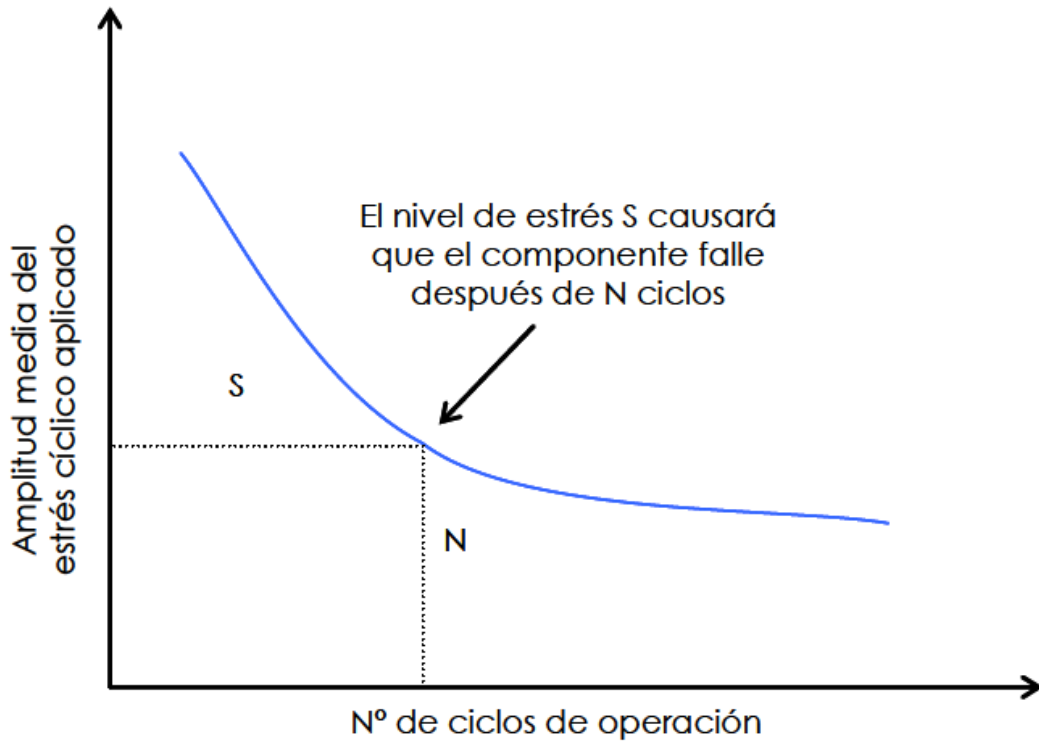


Figura 10: Curva S-N [10]

Aunque en un primer momento pueda parecer que se puede predecir con precisión la vida de un componente para una amplitud de estrés cíclico dado, esto no es así ya que la amplitud del estrés no es constante y la capacidad de resistir a la fatiga no es la misma para todos los componentes.

La función de densidad de elementos de este tipo se puede ajustar aceptablemente a una distribución de Weibull (se explicará más adelante) de parámetro de forma  $\beta=2$ .

Este patrón de tasa de fallo no está asociado exclusivamente a la fatiga, así como no todos los fallos relacionados con la fatiga se tienen que ajustar necesariamente a este patrón.

El patrón de fallo D (con un porcentaje de componentes que siguen dicho patrón menor del 8%) inicialmente tiene una tasa de fallos baja, creciendo rápidamente hasta que llega a la zona donde la tasa de fallos es constante hasta el final de su vida. Presenta una probabilidad condicionada de fallo asociada a una distribución de Weibull de parámetro de forma  $1 \leq \beta \leq 2$ .

El patrón de fallo E (con una proporción de componentes que siguen dicho patrón menor del 15%) es conocido como fallo aleatorio debido a que su tasa de fallo es constante a lo largo

del tiempo durante toda la vida útil del componente, por lo que dicho elemento puede fallar con la misma probabilidad (de forma aleatoria) en cualquier instante independientemente del tiempo que lleve funcionando. En componentes que siguen este patrón sería absurdo realizar cualquier tipo de mantenimiento ya que no se mejora en nada la probabilidad de que falle.

Por último, el patrón de fallo F, donde la proporción de componentes que siguen dicho patrón es mayor del 65% y que se le denomina curva de la J invertida, tiene una alta mortalidad infantil seguida de una tasa constante o en ligero aumento. Al principio tiene una probabilidad de fallo alta, decreciendo con el tiempo hasta llegar al instante donde la probabilidad de fallo es constante o con un ligero incremento.

#### *4.5.4.1 Modelado de la tasa de fallos*

Existen varios modelos estadísticos que se utilizan para modelar las curvas de las tasas de fallo, donde las más comunes son:

- Distribución de Weibull
- Distribución exponencial

#### **Distribución de Weibull**

Weibull, investigador sueco, propuso la distribución que lleva su nombre en 1939. Esta distribución es ampliamente utilizada por su gran flexibilidad, al poder ajustarse a una gran variedad de funciones de fiabilidad de dispositivos o sistemas. La expresión utilizada para el cálculo de la fiabilidad mediante la distribución de Weibull es [6]:

$$R(t) = e^{-\left[\frac{(t-\gamma)}{\eta}\right]^\beta} \quad (\text{ecuación 5.5.4.1.1})$$

Donde:

- $R(t)$  = Fiabilidad del equipo expresada en un valor probabilístico.
- $t$  = Es el intervalo de tiempo en el cual se desea conocer la fiabilidad del equipo, partiendo de un periodo del instante  $t=0$ .
- $\gamma$  = Parámetro de origen.

- $\beta$  = El parámetro de forma que, según la distribución de Weibull, relaciona el periodo de tiempo en el que se encuentra operando el equipo y el comportamiento del mismo ante la probabilidad de ocurrencia de fallos.
- $\eta$  = Parámetro de escala.

La distribución de Weibull se ajusta de forma adecuada a las tres zonas distintas de la curva de la bañera, según el valor que tenga el parámetro de forma. Se puede apreciar lo anteriormente expuesto en la siguiente figura:

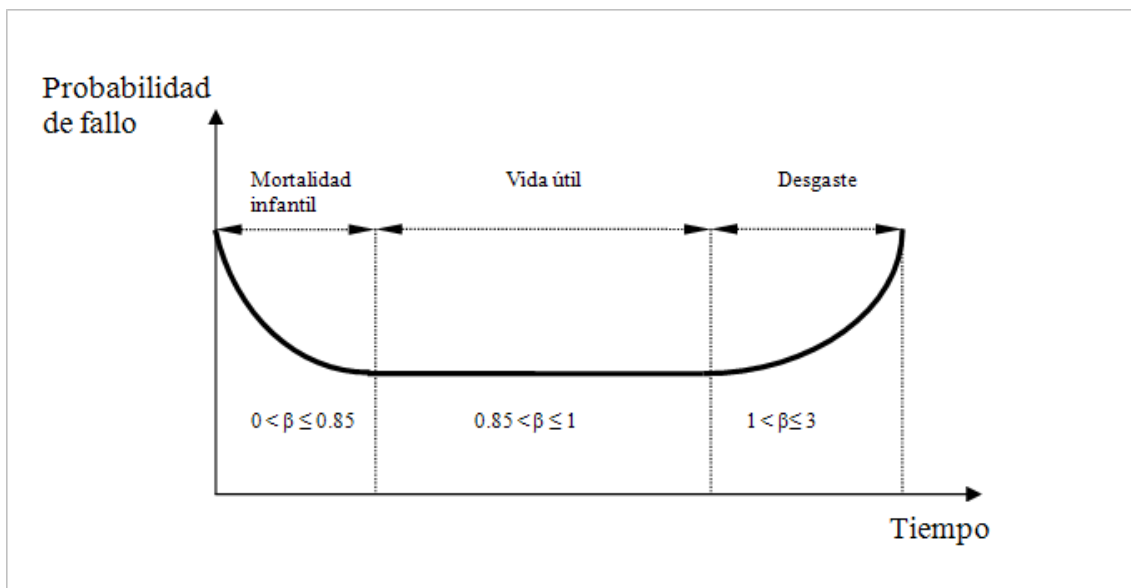


Figura 11: Curva de la bañera [11]

Los valores de los factores de forma adecuados según en la zona de la curva de la bañera en que se esté son:

- $0 < \beta \leq 0.85$ , el equipo está en la etapa de mortalidad infantil al inicio de la vida útil.
- $0.85 < \beta \leq 1$ , el equipo se encuentra en la etapa normal de vida útil.
- $1 < \beta < 3$ , el equipo se encuentra en la etapa de desgaste. Valores de  $\beta$  mayores que 1 indican que el equipo está comenzando a desgastarse. Valores de  $\beta$  mayores de 2 indican que el equipo se ha desgastado incrementándose el número de fallos en el mismo (el periodo de vida útil del equipo está llegando a su fin).

Otros valores interesantes del factor de forma son:

- $\beta=1$ ; tasa de fallos constante. Distribución exponencial.
- $\beta=2$ ; tasa de fallos lineal creciente.
- $\beta=3,5$ ; distribución normal.

### **Distribución Exponencial**

La distribución exponencial es un caso particular de la distribución de Weibull cuando ésta tiene un factor de forma igual a 1. Se caracteriza porque la tasa de fallos es constante y es la distribución que más se ajusta al comportamiento de equipos eléctricos y componentes electrónicos. La expresión utilizada para calcular la fiabilidad de un equipo en un tiempo determinado de operación, a partir de la distribución exponencial, es la siguiente:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \text{ (ecuación 5.5.4.1.2)}$$

Donde:

- $R(t)$  = Fiabilidad del equipo expresada en un valor probabilístico.
- $\lambda$  = Tasa de fallos del equipo = número de fallos /  $\Sigma$  Tiempos operación.
- $t$  = Es el intervalo de tiempo en el cual se desea conocer la fiabilidad del equipo, partiendo de un periodo del instante  $t=0$ .

## 5. Instalación

### 5.1 Introducción

La instalación sobre la que se va a realizar el plan de mantenimiento es un sistema de refrigeración de un motor diésel marino. Para poder analizar la instalación de forma adecuada es imprescindible saber cuáles son las funciones de un sistema de refrigeración. Es necesario conocer para qué se utilizan, el por qué de su necesidad, así como de los distintos tipos de refrigeración marina existentes en la actualidad.

Asimismo, es fundamental el conocimiento del motor a refrigerar para poder comprender el motivo por el cual es primordial la existencia de refrigeración en un motor. Es por ello que se explicará cómo funcionan los motores y los distintos tipos que se hallan en el mercado.

Aunque el plan de mantenimiento se va a realizar sobre un sistema de refrigeración de un motor marino en concreto, se expondrá de forma somera el abanico existente de sistemas de sistemas de refrigeración, con el propósito de dejar constancia de la variedad que hay de estos sistemas actualmente, aparte del analizado. No se explicarán detalladamente-ya que no es el objeto de este proyecto- los diferentes sistemas de refrigeración.

Por último, se describirá la instalación sobre la que se va a realizar el mantenimiento, señalando el tipo de sistema de refrigeración de la instalación y explicando minuciosamente su funcionamiento general, así como el funcionamiento de cada componente del sistema. Se indicarán las características técnicas de cada elemento exceptuando los componentes que por razones de confidencialidad no se pueden revelar.

### 5.2 Motor

Un motor es la parte de una máquina capaz de transformar algún tipo de energía (eléctrica, de combustibles fósiles, etc.) en energía mecánica, capaz de realizar un trabajo. Existen varios tipos:

- Motores de combustión interna: son motores que transforman la energía química en energía térmica y a partir de ésta se genera la energía mecánica, todo ello a partir de la combustión del fluido dentro del motor. El fluido que realiza la

combustión es una mezcla de comburente, que suele ser el aire, con combustible, normalmente derivados del petróleo y gasolina, de gas natural o biocombustibles.

- Motores de combustión externa: son motores térmicos pero, en este caso, la combustión se realiza en un fluido distinto al fluido del motor.
- Motores eléctricos: son motores que obtienen el trabajo a partir de una corriente eléctrica. Estos motores utilizan la inducción electromagnética que produce la electricidad para producir movimiento. Según sea la constitución del motor pueden ser de: núcleo con cable arrollado, sin cable arrollado, monofásico, trifásico, con imanes permanentes o sin ellos. La potencia depende del calibre del alambre, las vueltas del alambre y la tensión eléctrica aplicada.

Se va a profundizar en la tecnología y funcionamiento de los motores de combustión interna, ya que el sistema de refrigeración analizado es de este tipo.

### **5.2.1 Funcionamiento básico de un motor de combustión interna**

La función de un motor es la transformación de energía química en energía mecánica. La forma en que transforma dicha energía un motor de combustión interna es la siguiente: una mezcla de aire y combustible se introduce en un cilindro donde se comprime e inflama generando la suficiente presión en dicho cilindro para mover el pistón que, a través de la biela, hace girar el cigüeñal convirtiendo el movimiento rectilíneo del pistón en movimiento circular del cigüeñal. Una vez realizado la explosión, se produce la expulsión de los gases quemados al exterior, volviéndose a repetir el ciclo descrito sucesivamente. El movimiento del cigüeñal es el que posteriormente servirá para mover la máquina, transmitiendo el movimiento por medio de los elementos de transmisión.

En la siguiente figura se muestran las entradas y salidas de un motor donde se puede observar los sistemas auxiliares como son el de lubricación, de refrigeración y energía eléctrica:

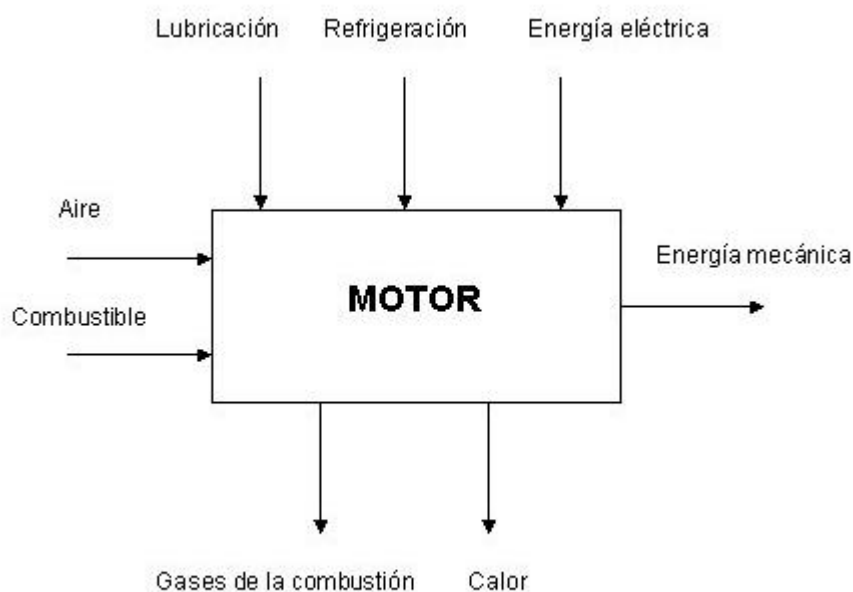


Figura 12: Diagrama de bloques de entradas y salidas de un motor [12]

Se va a explicar a continuación únicamente el sistema auxiliar de refrigeración ya que es la instalación a la que se le va a realizar el mantenimiento.

### 5.2.2 Sistemas de refrigeración marinos

Los motores se sobrecalientan debido a la gran cantidad de calor que desprenden en el momento de la explosión dentro de la cámara de combustión. Es necesario que parte de dicho calor se disipe para que los materiales del motor en contacto con la combustión no se fundan y, por lo tanto, el motor deje de funcionar. Esta es la razón fundamental por la cual los sistemas de refrigeración son tan importantes dentro de un motor marino de combustión interna.

Existen tres tipos de sistemas de refrigeración en los motores marinos: refrigeración por radiador, por enfriador de quilla o por intercambiador de calor. Son sistemas que enfrían tanto el aire comprimido antes de entrar en los cilindros del motor como las cámaras de combustión a través de las camisas del motor y el aceite de lubricación.



La refrigeración por radiador consta de dos circuitos cerrados donde circula líquido refrigerante: uno de ellos para enfriar el aire comprimido y el otro para refrigerar tanto el aceite de lubricación como las cámaras de combustión. En ambos circuitos el agua de refrigeración circula por unos serpentines donde es enfriado a través del aire que mueve un ventilador. Tras ser enfriado, el refrigerante circula en uno de los circuitos hacia el aftercooler para enfriar el aire comprimido, y en el otro hacia el intercambiador de calor del aceite de lubricación y hacia las camisas de las cámaras de combustión.

La refrigeración por enfriador de quilla consta, como en el anterior sistema, de dos circuitos cerrados para enfriar el aire comprimido así como el aceite de lubricación y las cámaras de combustión. La diferencia es la forma de enfriar el líquido refrigerante. En este sistema el refrigerante circula por unos serpentines que están situados en la quilla, refrigerándose de esta forma con el agua del mar.

La refrigeración por intercambiador de calor se explicará en el siguiente apartado detalladamente ya que es la instalación a la que se le va a realizar el mantenimiento, profundizándose más en ella.

### **5.3 Descripción de la instalación: Sistema de refrigeración**

La instalación a la que se le va a realizar el mantenimiento es un sistema de refrigeración con intercambiadores de calor de un motor marino perteneciente a un buque. La función del sistema es refrigerar el aire comprimido que entrará posteriormente en los cilindros, el aceite de lubricación, el combustible de retorno y las cámaras de combustión a través de las camisas del motor.

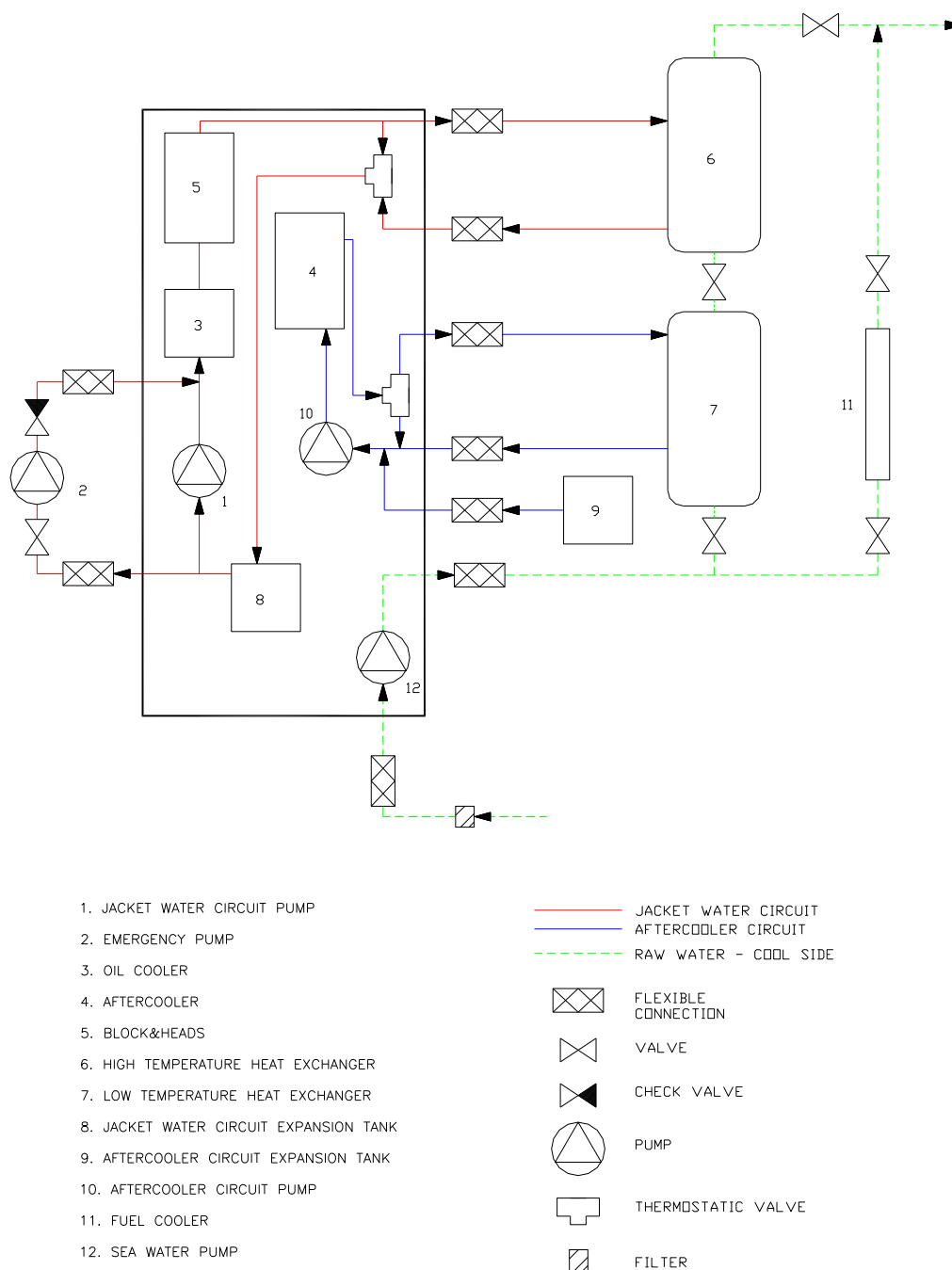


Figura 13: Esquema del sistema de refrigeración con intercambiadores de calor

El funcionamiento del sistema es el siguiente: una bomba aspira agua proveniente del mar que previamente ha circulado por un filtro para evitar la inclusión de sólidos en el sistema de refrigeración que puedan dañar los equipos. Dicha bomba impulsa el agua de mar paralelamente hacia un intercambiador de calor que permite refrigerar el combustible de retorno y hacia un intercambiador de calor perteneciente al circuito de baja temperatura que enfría el aire comprimido. El agua de mar una vez atravesado el intercambiador de calor de

baja temperatura se dirige hacia el intercambiador de calor integrado en el circuito de alta temperatura, que refrigera tanto el aceite de lubricación como las cámaras de combustión. El agua de mar una vez atravesado tanto el intercambiador de alta temperatura como el enfriador de combustible retorna al mar.

El intercambiador de calor de baja temperatura pertenece a un circuito cerrado por el que circula agua glicolada compuesto por una bomba, un aftercooler, una válvula mezcladora termostática de tres vías y un tanque de expansión. En el aftercooler, a través de la transferencia de calor del aire hacia el agua glicolada, se enfría el aire comprimido que va a entrar en los cilindros del motor. Una vez el líquido refrigerante ha enfriado el aire comprimido se dirige a la válvula termostática donde, si la temperatura del fluido es menor que la de tarado, el líquido se desvía hacia la bomba que impulsa el agua glicolada de nuevo hacia el aftercooler. En cambio, si se ha sobrepasado la temperatura de tarado, el refrigerante se dirige hacia el intercambiador de calor de baja temperatura para posteriormente ser impulsado por la bomba hacia el aftercooler. La función del tanque de expansión es la de absorber los aumentos de volumen debido a las dilataciones del fluido al calentarse.

El intercambiador de calor de alta temperatura pertenece a un circuito cerrado donde, como en el caso anterior, también circula agua glicolada y está compuesto por una bomba, un tanque de expansión, una válvula mezcladora termostática de tres vías, un intercambiador de calor que refrigera el aceite de lubricación y unas camisas que se encargan de enfriar las cámaras de combustión. El líquido que proviene del intercambiador de calor de aceite de lubricación y de las camisas del motor se deriva hacia el intercambiador de calor de alta temperatura y hacia la válvula termostática. La válvula termostática tiene dos orificios de entrada, conectado uno de ellos al líquido que viene directamente desde las camisas del motor y el otro al conducto donde circula el refrigerante una vez atravesado el intercambiador de calor de alta temperatura. Si en la salida de la válvula termostática el fluido se encuentra a una temperatura inferior a la de tarado, la válvula cierra la entrada del refrigerante que viene desde el intercambiador de calor circulando todo el fluido que viene directamente desde las camisas del motor hacia el tanque de expansión para posteriormente ser impulsado por la bomba hacia el intercambiador de calor de aceite de lubricación y las camisas. Cuando se detecta la temperatura de tarado se abre el orificio de entrada que está conectado al intercambiador de calor de alta temperatura realizándose la mezcla adecuada del fluido proveniente del intercambiador y del que viene directamente de las camisas del motor para

ser impulsado por la bomba pasando previamente por el tanque de expansión y siendo impulsado hacia la refrigeración del aceite de lubricación y las cámaras de combustión.

Donde se encuentra ubicada la bomba existe un circuito paralelo compuesto por una válvula, una bomba y una válvula de retención que es utilizado sólo en caso de emergencia, es decir, cuando la bomba que normalmente se encuentra en funcionamiento falla. Cuando esto ocurre se abre la válvula (que normalmente está cerrada) y el refrigerante circula por dicha válvula, la bomba de emergencia, la válvula de retención y posteriormente por el intercambiador de calor de aceite de lubricación y las camisas del motor realizando el mismo recorrido que con la bomba de normal funcionamiento. La válvula de retención evita que retorne líquido hacia la bomba de emergencia evitando daños en éste.

### **5.3.1 Elementos de la instalación**

#### **5.3.1.1 Filtro**

La función que desempeñan los filtros es la limpieza de impurezas o separación de ciertas sustancias del fluido que pasa a través de él.

En este sistema de refrigeración se hace pasar el agua proveniente del mar por el filtro para eliminar los posibles elementos sólidos que pueda tener el fluido y así no causar ningún tipo de daño a los equipos que posteriormente recorrerá.

El filtro se compone de un cuerpo y una tapa sujeta mediante una abrazadera. Del cuerpo salen las tubuladuras de entrada (tubuladura superior) y salida (tubuladura inferior). El agua a filtrar entra en la carcasa y tras atravesar el elemento filtrante fluye por el conducto de salida. Se le denomina cámara “sucia” al alojamiento que ocupa el agua sin filtrar y cámara “limpia” al alojamiento del agua una vez filtrada. La cámara de residuos es donde se acumula el residuo sólido a la espera de ser vaciado y se sitúa en la parte inferior del filtro. En la parte superior del filtro se sitúa la conexión de venteo y purga de aire, realizándose el vaciado por la parte inferior del filtro.

La filtración es mecánica, se hace mediante un perfil arrollado en espiral donde se retienen los sólidos arrastrados con el fluido. El elemento filtrante es de Urano B6 que es un acero

inoxidable austenítico con alta resistencia a la corrosión, cualidad necesaria ya que el agua de mar es altamente corrosivo.

El sistema de limpieza es manual. Cuando el filtro está sucio, se dan un par de vueltas al volante de limpieza para que unas cuchillas de teflón rasquen la superficie del elemento filtrante. Los sólidos retenidos caen verticalmente hasta el fondo de la carcasa ayudados por el propio giro del sistema de limpieza y por el flujo del producto filtrado. Cada cuatro o cinco limpiezas manuales, se evacuan por el manguito de purga.



Figura 14: Filtro HSBI [13]

Las características técnicas específicas del filtro de agua de mar del sistema de refrigeración se muestran a continuación.

Marca filtro	Hecisa
Modelo filtro	HSBI
Caudal (L/min)	600
Temperatura de diseño (°C)	62
Temperatura de servicio (°C)	32
Grado de filtración (micras)	100
$\Delta p$ (mbar)	< 150

Tabla 1: Características técnicas del filtro

### 5.3.1.2 Bombas

Una bomba es una máquina generadora que transforma una energía (generalmente mecánica) en energía hidráulica. Frecuentemente se utilizan para incrementar la presión de un líquido añadiendo energía al sistema hidráulico, para mover el fluido de una zona de menor presión o altitud a otra de mayor presión o altitud.

Las bombas de la instalación a la que se le realizará el mantenimiento son del tipo centrífugas de eje vertical. Dichas bombas disponen de una rueda con paletas (rodete) que gira dentro de una cámara hermética que está dotada de entrada y salida. El rodete es un elemento rodante de la bomba que convierte la energía mecánica proveniente del motor en energía cinética (la parte estática de la bomba convierte, en cambio, la energía cinética en energía de presión). El rodete está, a su vez, fijado al eje bomba, ensamblado directamente al eje de transmisión del motor o acoplado a él por medio de un acoplamiento rígido. Cuando entra líquido axialmente dentro del cuerpo de la bomba, el rodete (alimentado por el motor) proyecta el fluido a la zona externa del cuerpo-bomba debido a la fuerza centrífuga producida por la velocidad del rodete. El líquido, de esta manera, almacena una energía (potencial) que se transformará en caudal y altura de elevación (o energía cinética). Este movimiento centrífugo provoca, al mismo tiempo, una depresión capaz de aspirar el fluido que se debe bombear. Por último, tras pasar por el rodete y éste proyectar el fluido a la zona externa del cuerpo-bomba, el fluido sale por la tubería de impulsión, instalada en la salida de la voluta, a la presión y velocidad originadas en la bomba.

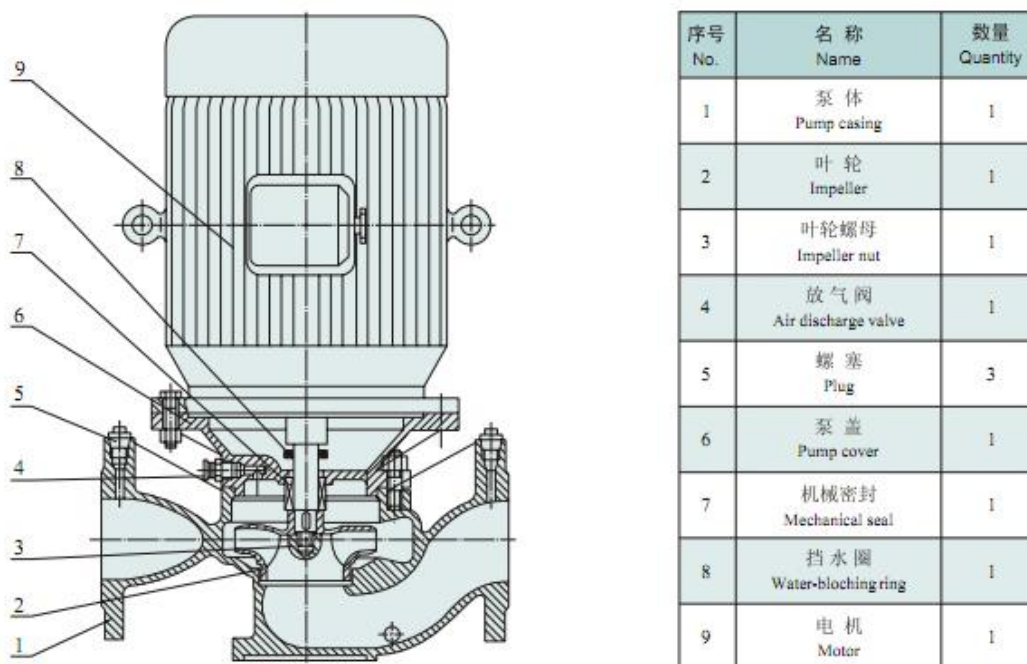


Figura 15: Esquema de una bomba centrífuga de eje vertical [14]

En el circuito de refrigeración hay cuatro bombas diferentes que, como se ha mencionado anteriormente, son de eje vertical y éstas son las siguientes:

- Bomba de agua de mar.
- Bomba del circuito de baja temperatura.
- Bomba del circuito de alta temperatura.
- Bomba de emergencia.

La bomba de agua de mar debe impulsar el agua que proviene del mar hacia los intercambiadores de alta y de baja temperatura así como al enfriador de combustible. La forma en que se transmite a la bomba la energía mecánica necesaria para su funcionamiento es a través del motor diésel. Entre el cigüeñal del motor diésel y el eje de la bomba hay un conjunto de engranajes para aumentar la velocidad, ya que la bomba gira más rápido que el motor. La bomba dispone de dispositivos antivibración para absorber las vibraciones que se puedan originar y así proteger al equipo de posibles daños debido a dichas vibraciones. A continuación se muestran las características técnicas de la bomba de agua de mar.

Bomba centrífuga de agua de mar	
Fluido a bombear	Agua de mar
Temperatura del fluido (°C)	32
Potencia consumida por la bomba (kW)	5,5
Caudal (L/min)	600
Altura de descarga (m)	24,6
Presión (kPa)	241,24359
Velocidad de rotación (rpm)	2394
Tipo de junta	Mecánica

**Tabla 2: Características técnicas de la bomba de agua de mar**

La bomba del circuito de baja temperatura debe impulsar agua glicolada (50% glicol etilénico) para refrigerar el aire de admisión en el aftercooler. Como en la bomba anterior, dispone de dispositivos antivibratorios y la potencia le viene desde el motor diesel con engranajes entre medias para que la bomba gire a la velocidad que debe. Las características técnicas se presentan a continuación.

Bomba centrífuga del circuito de baja temperatura	
Fluido a bombear	Agua glicolada (50% glicol etilénico)
Temperatura del fluido (°C)	48
Potencia consumida por la bomba (kW)	5,5
Caudal (L/min)	444
Altura de descarga (m)	4,6
Presión (kPa)	45,11059
Velocidad de rotación (rpm)	2400
Tipo de junta	Mecánica

**Tabla 3: Características técnicas de la bomba del circuito de baja temperatura**

La bomba del circuito de alta temperatura debe impulsar agua glicolada para refrigerar tanto al aceite de lubricación como las camisas del motor. Como en las bombas anteriores,



está acoplada al cigüeñal del motor mediante engranajes y también posee dispositivos antivibratorios. Las características técnicas de esta bomba se indican a continuación.

Bomba centrífuga del circuito de alta temperatura	
Fluido a bombear	Agua glicolada (50% glicol etilénico)
Temperatura del fluido (°C)	93,51
Potencia consumida por la bomba (kW)	5,5
Caudal (L/min)	1600
Altura de descarga (m)	7,3
Presión (kPa)	71,588545
Velocidad de rotación (rpm)	2400
Tipo de junta	Mecánica

**Tabla 4: Características técnicas de la bomba del circuito de alta temperatura**

La bomba de emergencia sólo funciona cuando la bomba del circuito de alta temperatura falla. Difiere con las otras en que es una electrobomba, es decir, la forma en que se transmite a la bomba la energía mecánica necesaria para su funcionamiento es a través de un motor eléctrico, que se acopla a la bomba a través de una brida de acoplamiento. El motor eléctrico es un motor asíncrono trifásico de jaula de ardilla con ventilación externa forzada. Las características técnicas del motor eléctrico se muestran a continuación.

Motor eléctrico	
Tensión de alimentación (V)	180
Frecuencia (Hz)	60
Número de fases	3
Número de polos	4
Velocidad de rotación (rpm)	2394
Tipo de protección	IP55
Rendimiento	0,87
Corriente nominal (A)	6,9
Factor de potencia	0,86
Potencia absorbida (kW)	6,3
Tipo de cojinetes	De rodamiento
Tipo de lubricante	Incorporado, de grasa

Tabla 5: Características técnicas del motor de la bomba del circuito de alta temperatura

Como en las bombas anteriores dispone de un dispositivo antivibratorio para proteger al equipo de posibles daños debido a las vibraciones. Las características técnicas son las mismas que la bomba del circuito de alta temperatura ya que realiza la misma función que ésta y, por tanto, los parámetros operativos tienen que ser iguales.

Bomba centrífuga de emergencia	
Fluido a bombear	Agua glicolada (50% glicol etilénico)
Temperatura del fluido (°C)	93,51
Potencia consumida por la bomba (kW)	5,5
Caudal (L/min)	1600
Altura de descarga (m)	7,3
Presión (kPa)	71,588545
Velocidad de rotación (rpm)	2400
Tipo de junta	Mecánica

Tabla 6: Características técnicas de la bomba de emergencia

### 5.3.1.3 Intercambiadores de calor

Un intercambiador de calor es un dispositivo cuya función es la de transferir energía (calor) entre dos fluidos sin ponerlos en contacto directo o estando éstos separados por una barrera. Se utilizan en sistemas de refrigeración, acondicionamiento de aire, producción de energía y procesamiento químico.

El sistema de refrigeración de la instalación a mantener tiene distintos tipos de intercambiadores de calor: intercambiadores de placas, de tubo-carcasa ya través de las camisas del motor.

Los intercambiadores de placas consisten en un conjunto de placas preformadas con unos canales en disposición paralela por donde circulan los fluidos. Dichas placas pueden estar separadas por juntas de estanqueidad o soldadas sin juntas y están montadas sobre un bastidor y dos placas sujetadas por espárragos de apriete que compactan las placas. Cada una de ellas dispone de cuatro bocas por donde circulan los fluidos siendo conducido uno de ellos por las placas pares y el otro por las impares, consiguiendo así el intercambio de calor deseado entre ambos.

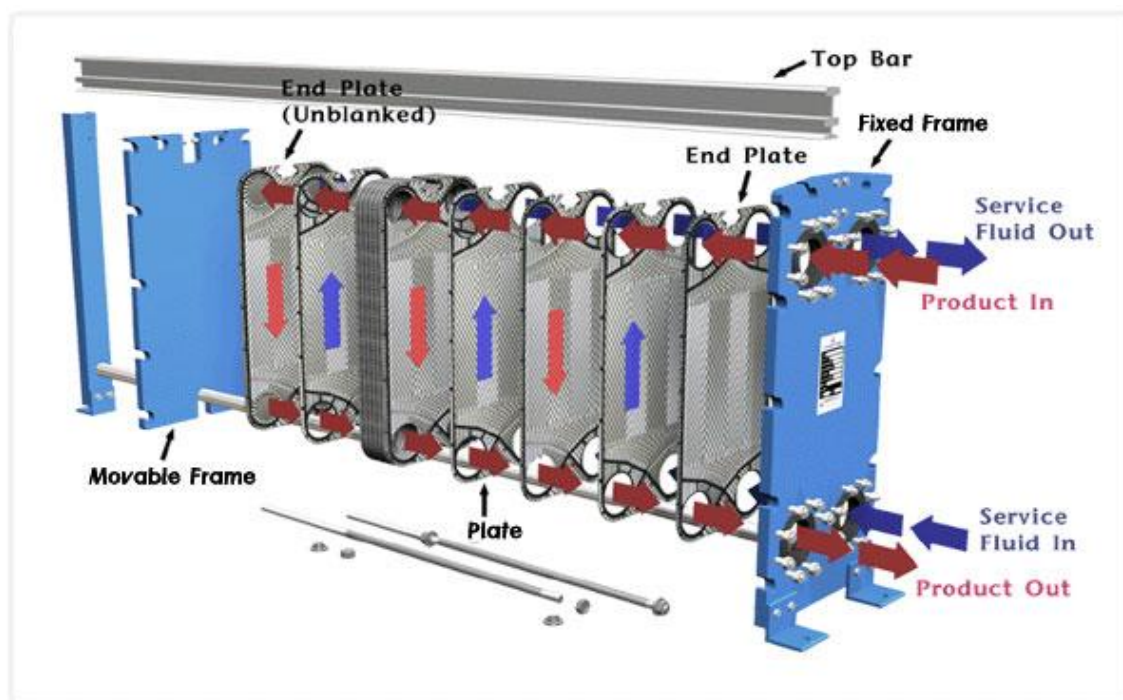


Figura 16: Funcionamiento de un intercambiador de placas [15]

En la instalación que se va a analizar hay tres intercambiadores de placas diferentes, los cuales son:

- Intercambiador de baja temperatura.
- Intercambiador de alta temperatura.
- Enfriador de combustible.

Las placas de estos intercambiadores son corrugadas para facilitar el intercambio térmico entre el fluido primario y el fluido secundario, siendo su material de titanio. Las juntas de estanqueidad son de caucho y el bastidor es de acero al carbono.

El intercambiador de placas de baja temperatura está diseñado para que el aftercooler funcione de manera óptima. Las características técnicas son:

Intercambiador de placas de baja temperatura				
	Lado Caliente		Lado frío	
Nombre del fluido	Agua glicolada (50% glicol etilénico)		Agua de mar	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Caudal (L/min)	444		600	
Temperatura de trabajo (°C)	62,03	48	32	41,16
Calor total intercambiado (kW)	374			
K-Servicio (W/(m <sup>2</sup> K))	6,074			
Área total de intercambio (m <sup>2</sup> )	3,36			
Pérdida de carga (kPa)	44,23			
LMTD (Diferencia de temperatura media logarítmica) (°C)	18,33			
Número de placas	30			

Tabla 7: Características técnicas del intercambiador de baja temperatura

El intercambiador de placas de alta temperatura está diseñado para que tanto la refrigeración del aceite de lubricación como la refrigeración de los cilindros del motor a través de las camisas se hagan de forma óptima. Sus características técnicas son:

Intercambiador de placas de alta temperatura				
	Lado Caliente		Lado frío	
Nombre del fluido	Agua glicolada (50% glicol etilénico)		Agua de mar	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Caudal (L/min)	1600		600	
Temperatura de trabajo (°C)	99	93,51	41,16	54,38
Calor total intercambiado (kW)	538			
K-Servicio (W/(m <sup>2</sup> K))	2,138			
Área total de intercambio (m <sup>2</sup> )	5,2			
Pérdida de carga (kPa)	97,05			
LMTD (Diferencia de temperatura media logarítmica) (°C)	48,38			
Número de placas	22			

Tabla 8: Características técnicas del intercambiador de alta temperatura

Los intercambiadores tubo-carcasa son los más utilizados en la industria y están compuestos por una carcasa cilíndrica en donde se hallan unos tubos cilíndricos, siendo el eje de estos tubos paralelos al eje de la carcasa. En los extremos de la carcasa se encuentran lo que se denomina cabezales. En uno de los extremos, antes del cabezal, se encuentra la placa tubular, que tiene agujeros donde se insertan los tubos para que se mantengan en su lugar. El intercambio de calor se produce debido a que uno de los fluidos circula por dentro de los tubos cilíndricos y el otro por el exterior de dichos tubos. Dentro de la carcasa se encuentran unos deflectores cuya misión es la de dirigir el flujo del fluido que circula por el exterior de los tubos y guiar al flujo para que se parezca lo máximo posible a las características del flujo cruzado.

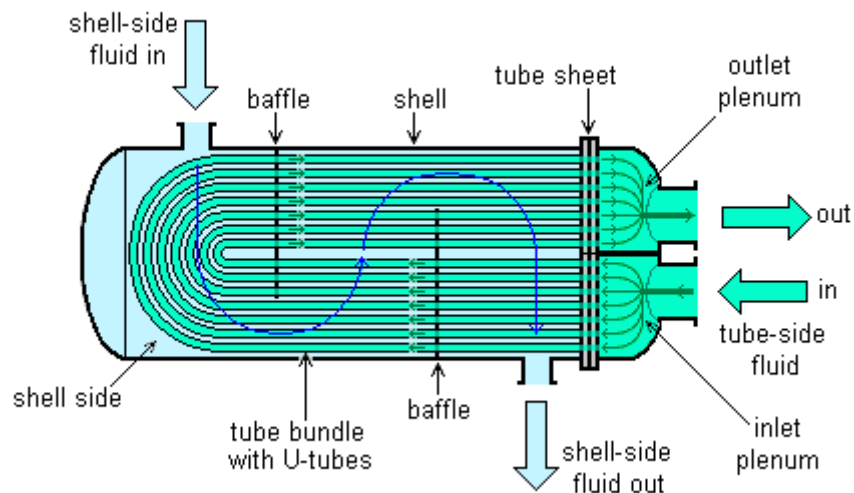


Figura 17: Intercambiador tubo-carcasa [16]

En el sistema de refrigeración al cual se le va a realizar el mantenimiento hay un intercambiador tubo-carcasa donde intercambian calor aceite de lubricación con agua glicolada del circuito de alta temperatura y otro (aftercooler) donde intercambian calor aire comprimido y agua glicolada.

Las camisas del motor rodean las cámaras de combustión, cilindros, asientos, guías de válvulas y partes en contacto con los gases resultantes de la combustión con el objetivo de refrigerar todas estas partes ya que adquieren temperaturas elevadas.

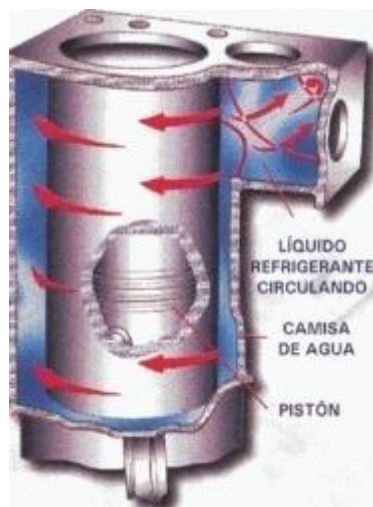


Figura 18: Camisa de un motor [17]

#### 5.3.1.4 Válvulas de bola

Las válvulas de bola o esfera sirven para regular el flujo de un fluido canalizado con un mecanismo regulador que se encuentra en el interior de la válvula y tiene forma de esfera perforada. La válvula se abre o cierra mediante el giro de un eje unido a la esfera perforada, siendo el giro necesario para abrirla o cerrarla de un cuarto de vuelta. Se utilizan para dejar, o no, pasar totalmente el fluido. Si se deja parcialmente abierta, el fluido y la presión del mismo desgastarán partes de la válvula que con el tiempo averiarán los interiores de la válvula dando lugar a fugas indeseables.

La válvula se abre mediante el accionamiento, girando la esfera perforada hasta que el agujero de la misma esté alineado totalmente con la entrada y salida del cuerpo de la válvula, mientras que el cierre se produce girando la esfera y estando el agujero de ésta perpendicular a las aberturas de flujo del cuerpo de la válvula, deteniéndose así el fluido. En los extremos de la esfera se encuentran asientos para que haya un perfecto sellado. El accionamiento puede ser mediante engranajes planetarios, manetas, actuadores eléctricos o neumáticos.

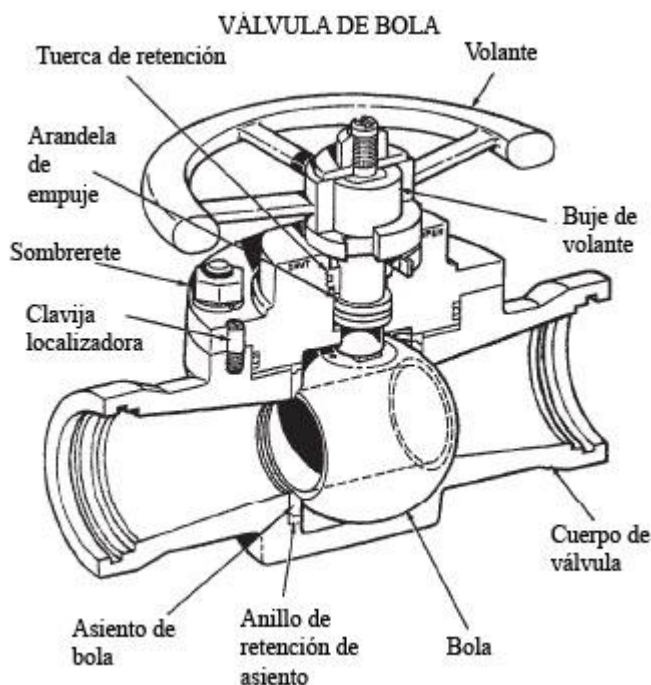


Figura 19: Funcionamiento de una válvula de bola [18]

En la instalación a mantener hay cinco válvulas de bola que son accionadas a través de una maneta de acero cromado. Al final de la maneta se encuentra una junta de teflón para

asegurar la estanqueidad. Para la apertura o cierre de las válvulas es necesario un giro de la maneta de 90 °C. No es posible actuar sobre dicho accionamiento remotamente, sólo manualmente. El cuerpo y la esfera son de acero inoxidable y los asientos de teflón. Su función es la de aislar los equipos (intercambiador de calor de baja temperatura, intercambiador de calor de alta temperatura y enfriador de combustible) para realizar su mantenimiento. Normalmente están abiertas y sólo se cierran cuando así se requiera para efectuar las labores de mantenimiento. Dichas válvulas son:

- Válvula de entrada del intercambiador de calor de baja temperatura.
- Válvula de salida del intercambiador de calor de baja temperatura o de entrada del intercambiador de alta temperatura.
- Válvula de salida del intercambiador de calor de alta temperatura.
- Válvula de entrada del enfriador de combustible.
- Válvula de salida del enfriador de combustible.

Por otro lado, en el circuito de emergencia se encuentra una válvula de bola con una función distinta a las anteriores pero con el mismo funcionamiento. En esta ocasión la válvula está normalmente cerrada, abriéndose exclusivamente cuando falla la bomba del circuito de alta temperatura para permitir el paso del fluido hacia la bomba de emergencia y que se pueda seguir refrigerando el aceite de lubricación y las camisas del motor. El material del cuerpo y la esfera son de acero inoxidable, y los asientos y la junta son de teflón, al igual que en las anteriores válvulas de mantenimiento.

#### ***5.3.1.5 Válvula de retención***

Una válvula de retención o antirretorno es un dispositivo mecánico que permite el paso del fluido a través de ella en un solo sentido.

En la instalación a mantener, la válvula de retención tiene un resorte que actúa sobre un vástago de la válvula que permite que el refrigerante fluya en un único sentido. El fluido llega a la válvula a través del cuerpo y la presión que ejerce el líquido hace que el resorte se comprima y el sistema se abra permitiendo que el refrigerante pueda circular. Cuando la presión se reduce a menos de 10 mbar, el resorte se descomprime y se cierra el sistema para evitar que el fluido circule en sentido contrario. La válvula se abre y cierra debido al movimiento de traslación que realiza el vástago sobre los denominados cojinetes de guía. El sellado es



fundamental para evitar que el refrigerante circule en sentido contrario y se realiza por medio del sello de la válvula que se presiona contra el asiento.

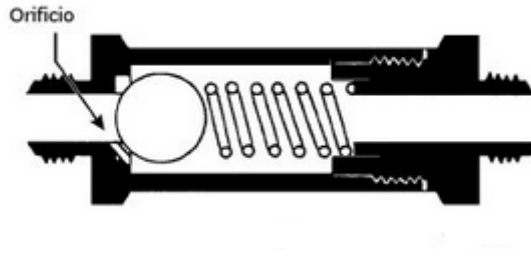


Figura 20: Esquema del funcionamiento de una válvula de retención [19]

Además de prevenir que el flujo bombeado regrese una vez la bomba ha sido detenida, también evita que el flujo de retorno provoque un giro inverso de la bomba, lo cual puede, en algunos casos, dañar la bomba.

#### ***5.3.1.6 Válvulas mezcladoras termostáticas de tres vías***

Una válvula mezcladora termostática de tres vías es un elemento mecánico con tres orificios (dos de entrada y uno de salida o dos de salida y uno de entrada) con un elemento termostático que regula la proporción adecuada de fluido que debe entrar o salir por cada orificio con la apertura o cierre de éstos mediante un pistón.

El elemento termostático suele ser una cera de composición especial que tiene la propiedad de dilatarse notablemente durante el paso del estado sólido al líquido. Cuando la cera alcanza el valor de fusión, ésta comienza a fundirse empujando un pistón que, a su vez, presiona un resorte venciendo la resistencia del mismo, abriéndose el orificio de la válvula con el consiguiente paso del fluido. Cuando la cera se enfría, el resorte recupera su elongación inicial debido a la contracción de ésta, cerrándose la válvula e impidiendo el paso del líquido.

Dentro de la instalación a la que se le va a realizar el mantenimiento se encuentran dos válvulas mezcladores termostáticas de tres vías:

- Válvula termostática de tres vías del circuito de alta temperatura.
- Válvula termostática de tres vías del circuito de baja temperatura.

La válvula termostática del circuito de alta temperatura tiene dos orificios de entrada y uno de salida. Cuando el fluido sale de las camisas del motor llega a una derivación que conduce al refrigerante, por un lado, hacia una de las entradas de la válvula termostática y, por otro lado, hacia el intercambiador de alta temperatura para enfriar el fluido y posteriormente dirigirse hacia la otra entrada de la válvula. El orificio de salida conduce el fluido hacia la bomba, pasando previamente por el tanque de expansión, para ser impulsado hacia el enfriador de aceite de lubricación y camisas del motor.

El termostato está situado en el orificio de salida de la válvula. Si la temperatura a la salida de la válvula es más fría que la temperatura de tarado, el orificio de entrada que está conectado al conducto por donde circula el refrigerante procedente del intercambiador, permanece cerrado circulando todo el fluido que entra por el otro orificio hacia el tanque de expansión, bomba, enfriador de aceite de lubricación y camisas del motor nuevamente. En el momento que el termostato detecta la temperatura de tarado de la válvula, se inicia la apertura del orificio de entrada de la válvula que está conectada con el intercambiador de calor debido a la dilatación del termostato al fundirse, que vence la fuerza del resorte obteniendo como resultado la apertura de éste. Con este hecho se provoca la mezcla del refrigerante procedente del intercambiador de calor con el que viene directamente desde las camisas del motor para que en la salida de la válvula el fluido esté a la temperatura óptima de funcionamiento.

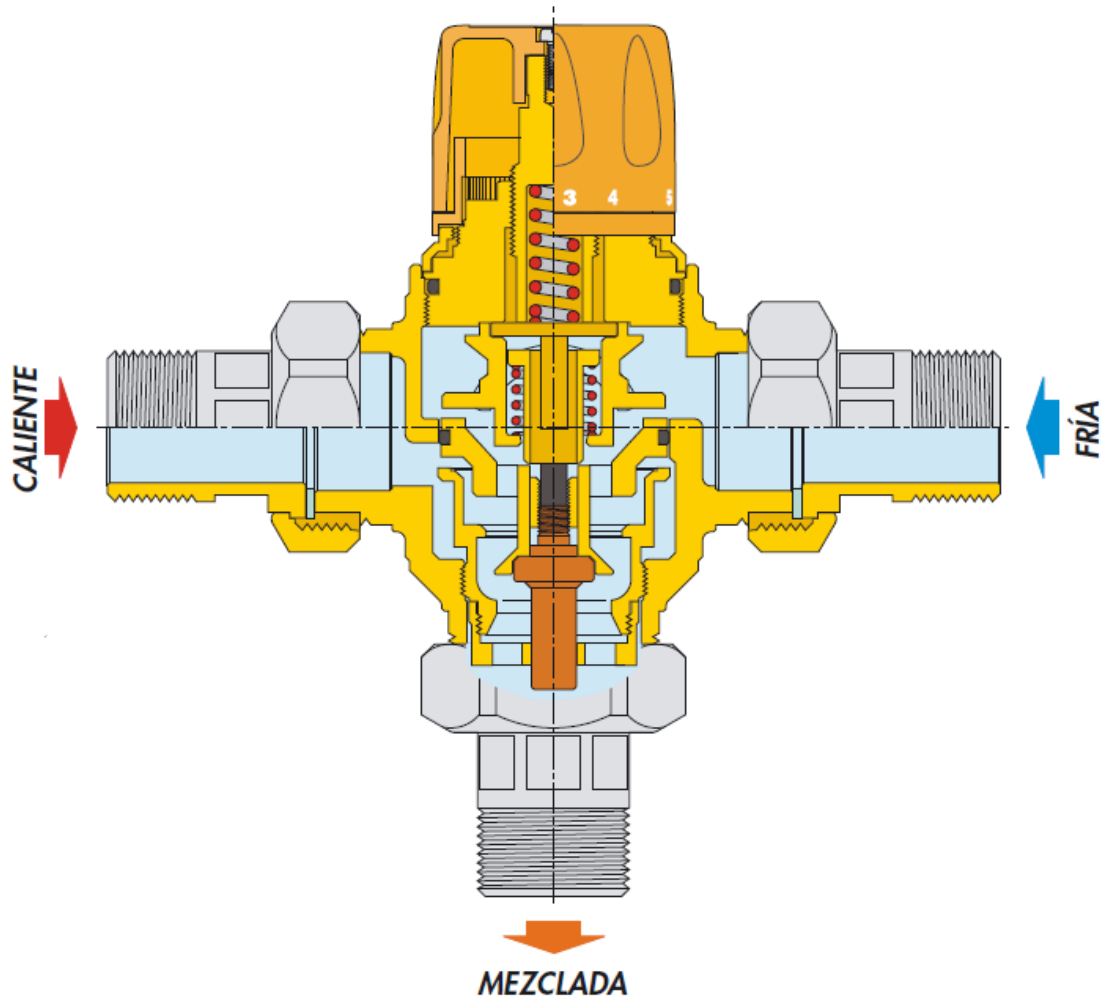


Figura 21: Esquema de una válvula mezcladora termostática de tres vías [20]

La válvula termostática de tres vías del circuito de baja temperatura tiene un orificio de entrada y dos de salida. El fluido entra a la válvula termostática procedente del aftercooler y sale de ésta, o hacia el intercambiador de calor de baja temperatura para enfriarse y posteriormente ser impulsado por la bomba al aftercooler o, directamente hacia la bomba sin pasar por el intercambiador de calor. En esta válvula termostática el caudal circula en sentido opuesto a cuando la válvula se usa como mezcladora, como es el caso de la válvula anterior. El refrigerante entra y pasa por el elemento termostático regulando el pistón de forma que para temperaturas por debajo de la de tarado, el fluido retorna directamente a la bomba para ser impulsado hacia el aftercooler, mientras que para temperaturas por encima de la de tarado el refrigerante se dirige hacia el intercambiador de calor para ser enfriado y posteriormente impulsado por la bomba hacia el aftercooler. En este último caso se realiza la apertura del orificio de la válvula, para que el fluido se dirija hacia el intercambiador de calor, debido a la

dilatación del elemento termostático con el consiguiente vencimiento de la fuerza del resorte del pistón que abre la válvula.

#### *5.3.1.7 Tanques de expansión*

Un tanque de expansión es un elemento utilizado en los circuitos de refrigeración para absorber el aumento de volumen que se produce al expandirse el fluido debido al calentamiento de éste y así evitar una presión excesiva en el circuito. El tanque de expansión está separado en dos zonas por una membrana impermeable. Una zona del tanque está en contacto con el circuito de refrigeración, por lo que está lleno de líquido refrigerante mientras que el otro lado contiene aire. Cuando el fluido aumenta de volumen, la membrana se mueve comprimiendo el aire.



Figura 22: Tanque de expansión [21]

Las funciones que realiza el tanque de expansión en este sistema de refrigeración son:

- Ventilar los gases para reducir la corrosión y evitar la pérdida de refrigerante debido al desplazamiento de los gases.
- Proporcionar una presión positiva a la bomba del sistema para evitar cavitación.
- Proporcionar volumen de expansión para evitar pérdida de refrigerante cuando el refrigerante se dilate debido a cambios de temperatura.
- Proporcionar un lugar para llenar el sistema, verificar su nivel y mantener sus aditivos químicos y corrosivos. Un interruptor de alarma situado en el depósito de expansión avisará inmediatamente en caso de pérdida de refrigerante.

En la instalación hay dos tanques de expansión: uno en el circuito de baja temperatura y el otro en el circuito de alta temperatura.

El tanque de expansión del circuito de baja temperatura se encuentra situado antes de la bomba que impulsa el fluido hacia el aftercooler. Se conecta con el circuito a través de un tubo vertical y una conexión flexible.

El tanque de expansión de alta temperatura se sitúa antes de la bomba que impulsa el líquido refrigerante al enfriador de aceite de lubricación y hacia las camisas del motor, pero en esta ocasión no se conecta con el circuito a través de un tubo vertical y una conexión flexible, sino que el fluido siempre circula por el tanque antes de llegar a la bomba.

#### ***5.3.1.8 Tuberías y conexiones***

Una tubería es un conducto que cumple la función de transportar fluidos. La forma es cilíndrica y se unen mediante bridas o uniones flexibles.

Una brida es un elemento que conecta dos tuberías mediante una unión con forma de circunferencia a la que se le realiza agujeros a lo largo de su longitud, y a través de los cuales se montan pernos de unión (pieza metálica larga de sección constante cilíndrica normalmente hecha de acero o hierro).

Una conexión flexible es un elemento de unión no rígida entre dos tuberías permitiendo cierto desplazamiento debido a que el elemento flexible se alarga o acorta en caso de contracciones o dilataciones de las tuberías a unir.

En la instalación a mantener las tuberías están unidas tanto con conexiones bridadas como flexibles.



Figura 23: Unión mediante brida entre dos tuberías [22]

## 6. Aplicación del análisis RCM a la instalación

Para la elaboración de la planificación del mantenimiento basado en la fiabilidad del sistema de refrigeración del motor marino diésel se realizará un FMECA para, posteriormente, programar las tareas de mantenimiento de cada equipo del sistema.

FMECA (Failure Mode Effects and Criticality Anlysis) es una extensión del FMEA (Failure Mode Effects and Analysis). FMECA es un método que sirve para indicar los efectos de los modos de fallo y analizar su criticidad. Para poder realizar este método, previamente se ha de definir el nivel de detalle que se va a efectuar. Los niveles de detalles, explicados con anterioridad, son: componente, equipo, sistema, planta y unidad. El nivel de detalle que se ha decidido que tenga esta instalación es a **nivel de equipo**. Se ha elegido dicho nivel debido a que si se realiza el FMECA a nivel componente sería un análisis con demasiado detalle que puede llevar a un trabajo demasiado laborioso y complicado no siendo realizable en algunos casos. Por otro lado, a nivel sistema sería un estudio demasiado superfluo y poco eficiente, mientras que a nivel equipo la información obtenida es muy detallada y precisa sin tener que detenerse en cada componente de cada equipo, que no daría información complementaria realmente útil.

Una vez definido el nivel de detalle se puede proceder al análisis FMECA. Para la elaboración de este análisis lo primero que se realizará es la descripción de las distintas funciones que en el sistema o dentro del sistema se efectúan. La definición de las funciones debe permitir conocer de forma clara el propósito de las mismas. A continuación, se describirá el fallo funcional de cada función, que es aquel estado en que se encuentra el activo de forma que no puede realizar de forma total o parcial una determinada función. El siguiente paso es la identificación de los modos de fallo y su evidencia al fallo. El modo de fallo es la descripción del evento que causa un fallo funcional. La evidencia del fallo puede ser visible u oculta. Es visible cuando al producirse el fallo el personal se da cuenta de que ha ocurrido. Por otro lado, el fallo es oculto cuando el personal no se da cuenta del fallo hasta que otro activo falla. Posteriormente, tras la descripción del modo de fallo y su evidencia al fallo, se enumerarán las posibles causas que pueden dar lugar al modo de fallo. Una vez mencionadas las posibles causas de los modos de fallo, se procederá a detallar los efectos sobre el equipo, el sistema y el buque. Tras este paso, se indicará la severidad del modo de fallo que clasifica los efectos de éstos sobre el buque en función del alcance de los mismos. Mediante la severidad del modo de

fallo y la probabilidad de ocurrencia de un fallo se halla el riesgo como se muestra a continuación:

Severidad	FRECUENCIA (PF: probabilidad de fallo)				
	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)
	FRECUENTE $PF > 10^{-1}$	PROBABLE $10^{-2} < PF \leq 10^{-1}$	OCASIONAL $10^{-3} < PF \leq 10^{-2}$	REMOTO $10^{-6} < PF \leq 10^{-3}$	IMPROBABLE $PF < 10^{-6}$
<b>CATASTROFICO (I)</b> Pérdida de vidas humanas Impacto medioambiental grave irreversible Daños valorados $> 1.000.000$ dólares					
<b>CRITICO (II)</b> Lesiones o enfermedad grave Impacto medioambiental grave reversible $200.000 < \text{Daños valorados} \leq 1.000.000$ dólares					
<b>MARGINAL (III)</b> Lesiones o enfermedad leve Impacto medioambiental mitigable $10.000 < \text{Daños valorados} \leq 200.000$ dólares					
<b>DESPRECIABLE (IV)</b> Lesiones menores que leves Mínimo impacto medioambiental $2.000 < \text{Daños valorados} \leq 10.000$ dólares					

Tabla 9: Matriz de criticidad

Como se puede observar en la tabla, la severidad se divide en cuatro categorías según los efectos producidos en el buque debido a distintos criterios: impacto sobre las vidas humanas (muertes, lesiones o enfermedades), impacto medioambiental e impacto económico de los daños sufridos. Las severidades, como muestra la tabla, de acuerdo a los distintos criterios son:

- Catastrófico: Pérdida de vidas humanas, incapacidad total permanente, impacto medioambiental grave irreversible que viola la ley o el reglamento y/o daños valorados en más de 1 millón de dólares.
- Crítico: Incapacidad parcial permanente, lesiones o enfermedades profesionales que pueda resultar en la hospitalización de al menos tres miembros del personal,



impacto medioambiental grave reversible que viola la ley o el reglamento y/o daños valorados entre 200 mil y 1 millón de dólares.

- Marginal: Enfermedades o lesiones profesionales que resulten uno o más días de trabajo perdidos, impacto medioambiental mitigable sin violación de la ley o reglamento donde las actividades de restauración pueden ser llevadas a cabo y/o daños valorados entre 10 y 200 mil dólares.
- Despreciable: Enfermedades o lesiones que no resulten en un día de trabajo perdido, mínimo impacto medioambiental sin violación de la ley o el reglamento y/o daños valorados entre 2 y 10 mil dólares.

En la tabla, también se muestran los cinco niveles en los que se divide la probabilidad de ocurrencia de los fallos, estos niveles son:

- Frecuente: Probabilidad de que ocurra a menudo en la vida del elemento, con una probabilidad de ocurrencia mayor que  $10^{-1}$ .
- Probable: Ocurrirá varias veces en la vida del elemento, con una probabilidad de ocurrencia entre  $10^{-2}$  y  $10^{-1}$ .
- Ocasional: Probabilidad de que ocurra en algún momento de la vida del elemento, con una probabilidad de ocurrencia entre  $10^{-3}$  y  $10^{-2}$ .
- Remoto: Es poco probable, pero es posible que ocurra en la vida del elemento, con una probabilidad de ocurrencia entre  $10^{-3}$  y  $10^{-6}$ .
- Improbable: Muy poco probable, se puede asumir que la ocurrencia puede no ser experimentada a lo largo de la vida del elemento, con una probabilidad de ocurrencia menor que  $10^{-6}$ .

El riesgo, como se puede observar en la tabla, puede ser alto (color rojo), medio (color amarillo) o bajo (color verde). Cada modo de fallo tendrá un riesgo asociado. En base a dicho riesgo, al coste, al MTBF, a si se reduce la probabilidad de fallo a niveles aceptables, a las recomendaciones del fabricante, al plan de inmovilización del buque y a la evidencia del fallo (visible u oculto) se desarrollará el plan de mantenimiento de la instalación con la selección de las tareas adecuadas a cada equipo.

## **6.1 Análisis RCM del sistema de refrigeración de un motor marino diésel**

### **6.1.1 Funciones, fallos funcionales, modos de fallo y evidencia al fallo**

En este apartado se va a realizar el análisis RCM del sistema de refrigeración de un motor marino diésel, para posteriormente seleccionar las tareas de mantenimiento de cada equipo. Dicho análisis se va a ir desglosando en partes. En la primera parte se va a mostrar las funciones que se realizan dentro del sistema así como su fallo funcional, los modos de fallo asociados a cada fallo funcional y la evidencia del fallo. Hay cuatro funciones distintas dentro de la instalación. La primera de ellas es la principal, cuyo objetivo es el de refrigerar los equipos que necesitan ser enfriados para el correcto funcionamiento del motor. La segunda función se encarga de proteger tanto a la bomba de emergencia como a las tuberías de posibles daños. La tercera es la de emergencia, que se utiliza cuando falla la bomba del circuito de alta temperatura. Por último, se encuentra la de mantenimiento cuya misión es la de aislar equipos para facilitar las labores de mantenimiento.

Se muestra a continuación, como se ha comentado anteriormente, la parte del análisis RCM de las funciones, fallos funcionales, modos de fallo y evidencia del fallo.

Descripción Función		Descripción Fallo Funcional		Descripción Modo de Fallo		Evidencia del Fallo
1	REFRIGERACIÓN:  Refrigerar el aceite de lubricación, el combustible de retorno, el aire comprimido de admisión y las cámaras de combustión a través de las camisas del motor diésel.	1a	No se refrigera de forma adecuada o totalmente: el aceite de lubricación, el combustible de retorno, el aire comprimido de admisión y las cámaras de combustión a través de las camisas del motor.	1a1	Fallo de la bomba de agua de mar.	Visible
				1a2	Fallo del intercambiador de calor de baja temperatura.	Visible
				1a3	Fallo del intercambiador de calor de alta temperatura.	Visible
				1a4	Fallo de la válvula termostática del circuito de alta temperatura.	Visible
				1a5	Fallo de la bomba del circuito de alta temperatura.	Visible
				1a6	Fallo del intercambiador de calor aceite de lubricación.	Visible
				1a7	Fallo de las camisas del motor diésel.	Visible
				1a8	Fallo de la válvula termostática del circuito de baja temperatura.	Visible
				1a9	Fallo de la bomba del circuito de baja temperatura.	Visible
				1a10	Fallo del aftercooler.	Visible
				1a11	Fallo del enfriador de combustible.	Visible
				1a12	Fallo de las tuberías o conexiones.	Visible
				1a13	Fallo del filtro.	Visible

Descripción Función		Descripción Fallo Funcional		Descripción Modo de Fallo		Evidencia del Fallo
2	<b>PROTECCIÓN:</b>  Proteger a los elementos del sistema de refrigeración, como son las bombas o las tuberías, ante posibles daños.	2a	No se protege a las bombas de forma adecuada ante posibles daños.	2a1	Fallo de la válvula de retención de la bomba de emergencia.	Oculto
				2a2	Fallo del filtro.	Visible
				2a3	Fallo del tanque de expansión del circuito de baja temperatura.	Visible
				2a4	Fallo del tanque de expansión del circuito de alta temperatura.	Visible
		2b	No se protege a las tuberías de forma adecuada ante posibles daños.	2b1	Fallo del tanque de expansión del circuito de baja temperatura.	Visible
				2b2	Fallo del tanque de expansión del circuito de alta temperatura.	Visible

Descripción Función		Descripción Fallo Funcional		Descripción Modo de Fallo		Evidencia del Fallo
3	<p>EMERGENCIA:</p> <p>Se pone en funcionamiento el circuito de la bomba de emergencia para que el sistema de refrigeración siga cumpliendo con su función cuando falla la bomba del circuito de alta temperatura.</p>	3a	<p>No es posible poner en funcionamiento el circuito de la bomba de emergencia o no funciona de forma adecuada, no siendo capaz de realizar el sistema de refrigeración su función cuando falla la bomba del circuito de alta temperatura.</p>	3a1	Fallo de la válvula del circuito de la bomba de emergencia.	Oculto
				3a2	Fallo de la bomba de emergencia.	Oculto
				3a3	Fallo de la válvula de retención de la bomba de emergencia.	Oculto

Descripción Función		Descripción Fallo Funcional		Descripción Modo de Fallo		Evidencia del Fallo
4	<b>MANTENIMIENTO:</b>  Aislar los equipos del sistema de refrigeración para poder realizar tareas de mantenimiento.	4a	No se pueden aislar los equipos del sistema para poder realizar tareas de mantenimiento cuando así se requiera.	4a1	Fallo de la válvula de entrada del intercambiador de calor de baja temperatura.	Oculto
				4a2	Fallo de la válvula de salida del intercambiador de calor de baja temperatura o de entrada del intercambiador de alta temperatura.	Oculto
				4a3	Fallo de la válvula de salida del intercambiador de calor de alta temperatura.	Oculto
				4a4	Fallo de la válvula de entrada del enfriador de combustible.	Oculto
				4a5	Fallo de la válvula de salida del enfriador de combustible.	Oculto

### **6.1.2 Causa de los fallos de los equipos**

Después de la descripción de las funciones con sus fallos funcionales, modos de fallo y evidencias al fallo se van a enumerar las posibles causas que pueden dar lugar al modo de fallo. Se van a agrupar por equipos para una mayor simplicidad. Las posibles causas de fallo de cada equipo se muestran en las siguientes tablas:

### 6.1.2.1 Electrobomba (bomba de emergencia)

Modo de fallo		Avería		Causa probable	
3a2	Fallo de la bomba de emergencia.	1	La bomba no arranca.	1a	Interrupción de la conexión entre el motor y la línea de alimentación.
				1b	Tensión de línea demasiado baja.
				1c	Interrupción de una fase de la línea de alimentación.
				1d	Bobinado del motor en cortocircuito.
				1e	Bobinado conectado a masa.
				1f	Cojinetes del motor gripados.
				1g	Sobrecarga de la bomba.



Modo de fallo		Avería		Causa probable	
3a2	Fallo de la bomba de emergencia.	2	La bomba no descarga líquido.	2a	Velocidad de rotación demasiado baja para interrupción de una fase del bobinado del estátor.
				2b	Sentido de rotación contrario al indicado.
		3	La bomba no ofrece el caudal suficiente.	3a	Tubos de aspiración parcialmente obstruidos.
				3b	Rotor dañado.
		4	La empaquetadura gotea excesivamente.	4a	Anillos de la junta desgastados o juntas rotas.
				4b	Anillos de la junta no lubricados o mal colocados.

Modo de fallo		Avería		Causa probable	
3a2	Fallo de la bomba de emergencia.	5	Vibraciones y ruidos.	5a	Cavitación o aire dentro de la bomba.
				5b	Fijación de los componentes de la electrobomba aflojada.
				5c	Dispositivos antivibración dañados o desgastados.
		6	Ruido y sobrecalentamiento del motor eléctrico.	6a	Pasos de aire de refrigeración del motor obstruidos.
				6b	Rotación del rotor con el estátor por reducción del entrehierro.
				6c	Apertura del relé térmico.
				6d	Apertura del interruptor automático o quemadura de uno o más fusibles del circuito de control.
				6e	Sobrecarga de la bomba.
				6f	Cojinetes gripados.

Modo de fallo		Avería		Causa probable	
3a2	Fallo de la bomba de emergencia.	7	Sobrecalentamiento de los bobinados del motor eléctrico.	7a	Arranques demasiado frecuentes y funcionamiento en condiciones que superan los límites para los que ha sido construido el motor. El relé de protección no funciona.
				7b	Tensión demasiado alta o frecuencia demasiado baja (normalmente, este problema viene acompañado de un zumbido).

*6.1.2.2 Bombas centrífugas (Bomba de agua de mar, del circuito de alta temperatura y del circuito de baja temperatura)*

Modo de fallo		Avería		Causa probable	
1a1	Fallo de la bomba de agua de mar.	1	La bomba no arranca.	1a	Sobrecarga de la bomba.
1a5	Fallo de la bomba del circuito de alta temperatura.	2	La bomba no descarga líquido.	2a	Sentido de rotación contrario al indicado.
1a9	Fallo de la bomba del circuito de baja temperatura.	3	La bomba no ofrece el caudal suficiente.	3a	Tubos de aspiración parcialmente obstruidos.
				3b	Rotor dañado.
		4	La empaquetadura gotea excesivamente.	4a	Anillos de la junta desgastados o juntas rotas.
				4b	Anillos de la junta no lubricados o mal colocados.

Modo de fallo		Avería		Causa probable	
1a1	Fallo de la bomba de agua de mar.	5	Vibraciones y ruidos.	5a	Cavitación o aire dentro de la bomba.
1a5	Fallo de la bomba del circuito de alta temperatura.			5b	Fijación de los componentes de la bomba aflojada.
1a9	Fallo de la bomba del circuito de baja temperatura.			5c	Dispositivos antivibración dañados o desgastados.

### 6.1.2.3 Filtro

Modo de fallo		Avería		Causa probable	
1a13 2a2	Fallo del filtro.	1	No se aprecia resistencia al girar el volante de limpieza o al girarlo no se limpia el filtro.	1a	Cuchillas sin aproximar.
				1b	Cuchillas desgastadas.
		2	El líquido se escapa por la salida de limpieza.	2a	Juntas deformadas y/o desgastadas.
		3	El líquido se escapa del interior del filtro por la tapa.	3a	Juntas deformadas y/o desgastadas.
		4	El líquido se escapa del interior del filtro por el eje del volante.	4a	Juntas deformadas y/o desgastadas.
		5	Una vez colocado el elemento filtrante en su sitio no asienta bien.	5a	Juntas deformadas y/o desgastadas.

Modo de fallo		Avería		Causa probable	
1a13 2a2	Fallo del filtro.	6	Una vez colocado el disco de apoyo del elemento filtrante no asienta bien.	6a	Juntas deformadas y/o desgastadas.
		7	El volante gira con dificultad.	7a	Cuchillas demasiado aproximadas.
				7b	Cojinetes planos desgastados.

*6.1.2.4 Intercambiadores de calor tubo-carcasa (aceite de lubricación y aftercooler)*

Modo de fallo		Avería		Causa probable	
1a6	Fallo del intercambiador de calor aceite de lubricación.	1	Refrigeración incorrecta.	1a	Fallo en el circuito de tubos.
1a10	Fallo del aftercooler.			1b	Obturación de las placas tubulares.
				1c	Presencia de aire en los cabezales.
				1d	Suciedad en el haz tubular.
				2a	Juntas de cabezales defectuosas.
		2	Fugas externas.	3a	Tubo defectuoso.
		3	Fugas internas.	4a	Expansión por laminación defectuosa.
		4	Fugas internas localizadas en los orificios de control de fugas.		



*6.1.2.5 Intercambiadores de calor de placas (intercambiadores de calor de baja y de alta temperatura y enfriador de combustible)*

Modo de fallo		Avería		Causa probable	
1a2	Fallo del intercambiador de calor de baja temperatura.	1	Refrigeración incorrecta, pérdida de carga excesiva o caudal insuficiente.	1a	Ensuciamiento en los canales de flujo de las placas.
1a3	Fallo del intercambiador de calor de alta temperatura.	2	Fugas externas.	1b	Ensuciamiento en las conexiones.
1a11	Fallo del enfriador de combustible.			2a	Trabajando a una presión superior a la indicada.
				2b	Apriete insuficiente del intercambiador.
				2c	Deformación de las placas.
				2d	Falta de elasticidad de las juntas.
				2e	Corrosión de las placas.
		3	Fugas internas.	3a	Perforación de las placas.
				3b	Corrosión de las placas.

**6.1.2.6 Válvula de retención de la bomba de emergencia**

Modo de fallo		Avería		Causa probable	
2a1 3a3	Fallo de la válvula de retención de la bomba de emergencia.	1	Fugas internas.	1a	Asiento dañado.
		2	Fugas externas.	2a	Cuerpo deteriorado.

*6.1.2.7 Válvulas de mantenimiento y válvula del circuito de la bomba de emergencia*

Modo de fallo		Avería		Causa probable	
4a1	Fallo de la válvula de entrada del intercambiador de calor de baja temperatura.	1	Fugas internas.	1a	Asientos de la esfera dañados.
				1b	Maneta dañada.
4a2	Fallo de la válvula de salida del intercambiador de calor de baja temperatura o de entrada del intercambiador de alta temperatura.	2	Fugas externas.	2a	Junta de la maneta dañada.
4a3	Fallo de la válvula de salida del intercambiador de calor de alta temperatura.	3	Enclavamiento de la válvula (no se puede abrir ni cerrar la válvula).	3a	Maneta dañada.
4a4	Fallo de la válvula de entrada del enfriador de combustible.				
4a5	Fallo de la válvula de salida del enfriador de combustible.				
3a1	Fallo de la válvula del circuito de la bomba de emergencia.				

### 6.1.2.8 Tanques de expansión

Modo de fallo		Avería		Causa probable	
2a3 2b1	Fallo del tanque de expansión del circuito de baja temperatura.	1	Vaciado defectuoso.	1a	Obstrucción del conducto por impurezas del fluido.
2a4 2b2	Fallo del tanque de expansión del circuito de alta temperatura.	2	Fallo en la detección de nivel.	2a	Detector dañado.
				2b	Fuga en las conexiones.
		3	Fuga del fluido (grieta pasante).	3a	Solicitud extraordinaria.
				3b	Corrosión.
				3c	Incorrecta instalación de las uniones embridadas, par de apriete insuficiente.

*6.1.2.9 Válvulas mezcladoras termostáticas de tres vías*

Modo de fallo		Avería		Causa probable	
1a4	Fallo de la válvula termostática del circuito de alta temperatura.	1	Fugas.	1a	Deformación, desgaste o rotura de la junta.
1a8	Fallo de la válvula termostática del circuito de baja temperatura.	2	Temperatura del fluido incorrecta.	2a	Mal ajuste del tarado de temperatura (apriete del tornillo de tarado insuficiente o excesivo).
				2b	Rotura del resorte.
				2c	Incrustaciones y suciedad.

**6.1.2.10 Camisas del motor**

Modo de fallo		Avería		Causa probable	
1a7	Fallo de las camisas del motor diésel.	1	Fugas.	1a	Cavitación o erosión de la pared exterior de las camisas debido a vibraciones.
				1b	Grietas longitudinales debido a golpes axiales o bloqueo hidráulico.

**6.1.2.11 Tuberías y conexiones**

Modo de fallo		Avería		Causa probable	
1a12	Fallo de las tuberías o conexiones.	1	Fugas.	1a	Golpe de ariete.
				1b	Sobrepresión.
				1c	Grietas en las tuberías o conexiones.
				1d	Apriete insuficiente en la unión mediante brida.
				1e	Deformación, desgaste o rotura de las juntas.

### 6.1.3 Efectos sobre equipo, sistema y buque y severidad del modo de fallo

Una vez enumeradas las averías más factibles que pueden dar lugar a los modos de fallo y las causas más probables que producen dichas averías se va a proceder a describir los efectos que producen los modos de fallo así como su severidad.

En primer lugar, se van a explicar los efectos que tiene el modo de fallo sobre el equipo, es decir, cómo afecta el fallo a la funcionalidad de dicho equipo. A continuación, se van a señalar los efectos sobre el sistema, cómo influye dicho modo de fallo sobre el conjunto del sistema de refrigeración. Tras definir los efectos que se producen tanto en el equipo como en el sistema se describirán los efectos que se producen en el buque.

El efecto que tiene el fallo sobre el buque es lo que determinará la severidad del modo de fallo que, posteriormente junto a la probabilidad de que ocurra el fallo, servirá para definir el riesgo mediante la matriz de criticidad.

Por último, debido a su importancia en los efectos sobre el buque, hay que puntualizar que en el sistema de refrigeración existen detectores de presión y de temperatura que controlan dichos parámetros para que en caso de valores anormales se pueda actuar sobre el motor, parándolo en caso necesario.

Como se ha mencionado anteriormente, a continuación se procede a la descripción de los efectos sobre el equipo, el sistema y el buque, así como la severidad de cada modo de fallo:



Modo de fallo		Efecto sobre el equipo	Efecto sobre el sistema	Efecto sobre el buque	Severidad
1a1	Fallo de la bomba de agua de mar.	El equipo no bombea totalmente o con la presión necesaria para que llegue el caudal adecuado de agua de mar a los intercambiadores de calor.	Debido a que no llega el volumen adecuado a los intercambiadores de calor no se transfiere el calor suficiente a los fluidos de refrigeración, teniendo como consecuencia que el sistema no refrigera de forma adecuada todos los elementos que debe enfriar: el combustible de retorno, el aire comprimido de admisión, el aceite de lubricación y las cámaras de combustión del motor a través de las camisas.	<p>Se detiene el motor evitando que se pueda gripar o romper.</p> <p>Si el combustible de retorno no se enfría lo suficiente puede sobrecalentarse demasiado, produciendo la inflamación de la misma originando una explosión. Es una situación de alto riesgo para el buque y la dotación con posible pérdida de vidas humanas, pero hay sensores que al detectar una temperatura mayor de lo debido indican que se ha de parar el motor, disminuyendo la severidad del fallo de catastrófico a crítico.</p> <p>Daños valorados entre 200 mil y 1 millón de dólares.</p>	Crítico

Modo de fallo		Efecto sobre el equipo	Efecto sobre el sistema	Efecto sobre el buque	Severidad
1a2	Fallo del intercambiador de calor de baja temperatura.	No se transfiere el calor suficiente, no alcanzando el fluido de refrigeración del circuito de baja temperatura la temperatura idónea para una correcta refrigeración. Pueden existir pérdidas de líquido refrigerante así como de agua de mar.	No se refrigera de forma adecuada el aire comprimido de admisión.  También afecta al intercambiador de calor de alta temperatura, no transfiriendo en ésta el suficiente calor para enfriar de forma idónea el fluido del circuito de alta temperatura, ya que el agua de mar que intercambia calor en este intercambiador proviene del intercambiador de calor de baja temperatura, por lo que tampoco se refrigera de forma óptima el aceite de lubricación ni las cámaras de combustión.	Se detiene el motor para evitar que se pueda gripar o romper.  Daños valorados entre 200 mil y 1 millón de dólares.	Crítico

Modo de fallo		Efecto sobre el equipo	Efecto sobre el sistema	Efecto sobre el buque	Severidad
1a3	Fallo del intercambiador de calor de alta temperatura.	No se transfiere el calor suficiente, no alcanzando el fluido de refrigeración del circuito de alta temperatura la temperatura idónea para una correcta refrigeración. Pueden existir pérdidas de líquido refrigerante así como de agua de mar.	No se refrigera de forma óptima ni el aceite de lubricación ni las cámaras de combustión.	Se detiene el motor para evitar que se pueda gripar o romper.  Daños valorados entre 200 mil y 1 millón de dólares.	Crítico
1a4	Fallo de la válvula termostática del circuito de alta temperatura.	No se regula adecuadamente la temperatura que debe tener el fluido refrigerante para enfriar de forma óptima el aceite de lubricación y las cámaras de combustión.	No se refrigera de forma óptima ni el aceite de lubricación ni las cámaras de combustión.	Se detiene el motor para evitar que se pueda gripar o romper.  Daños valorados entre 200 mil y 1 millón de dólares.	Crítico

Modo de fallo		Efecto sobre el equipo	Efecto sobre el sistema	Efecto sobre el buque	Severidad
1a5	Fallo de la bomba del circuito de alta temperatura.	El equipo no bombea totalmente o con la presión necesaria para que llegue el caudal adecuado de agua glicolada al intercambiador de calor de aceite de lubricación ni a las camisas del motor.	No se refrigera de forma óptima ni el aceite de lubricación ni las cámaras de combustión. Existe redundancia debido a que en paralelo hay una bomba que se utiliza en caso de que falle dicha bomba, manteniendo el correcto funcionamiento del sistema de refrigeración.	Debido a la redundancia se reduce la severidad.  El motor sigue funcionando reduciéndose la disponibilidad de los equipos y el sistema.  Daños valorados entre 10 y 200 mil dólares.	Marginal
1a6	Fallo del intercambiador de calor aceite de lubricación.	No se transfiere el calor suficiente, no alcanzando el aceite de lubricación la temperatura idónea para un correcto funcionamiento. Pueden existir pérdidas de aceite de lubricación así como de agua glicolada.	Debido al sobrecalentamiento del aceite de lubricación por la mala refrigeración de éste, disminuye su viscosidad perdiendo poder de lubricación, además de empeorar la función desempeñada de refrigeración de las cámaras de combustión.	Se detiene el motor para evitar que se pueda gripar o romper.  Daños valorados entre 200 mil y 1 millón de dólares.	Crítico

Modo de fallo		Efecto sobre el equipo	Efecto sobre el sistema	Efecto sobre el buque	Severidad
1a7	Fallo de las camisas del motor diésel.	Pérdida de aceite de lubricación y entrada de agua glicolada dentro de las cámaras de combustión. No se transfiere de forma adecuada el calor necesario.	Se produce un consumo excesivo de aceite que conlleva un sobrecalentamiento y una mayor fricción entre el pistón y las paredes de las camisas motor.  La entrada de líquido refrigerante a las cámaras de combustión provocaría un mal funcionamiento del motor pudiendo llegar a romperse.	Se detiene el motor para evitar que se pueda gripar o romper.  Daños valorados entre 200 mil y 1 millón de dólares.	Crítico
1a8	Fallo de la válvula termostática del circuito de baja temperatura.	No se regula adecuadamente la temperatura que debe tener el fluido refrigerante para enfriar de forma óptima el aire comprimido de admisión.	No se refrigera de forma óptima el aire comprimido de admisión.	Se detiene el motor para evitar que se pueda gripar o romper.  Daños valorados entre 200 mil y 1 millón de dólares.	Crítico

Modo de fallo		Efecto sobre el equipo	Efecto sobre el sistema	Efecto sobre el buque	Severidad
1a9	Fallo de la bomba del circuito de baja temperatura.	El equipo no bombea totalmente o con la presión necesaria para que llegue el caudal adecuado de agua glicolada al aftercooler.	No se refrigera de forma óptima el aire comprimido de admisión.	<p>El motor está programado para que en cada momento entre el aire comprimido y el combustible adecuado. Si el aire comprimido entra a la cámara de combustión con una temperatura mayor de la esperada, entrará una cantidad de masa menor de lo previsto, pero los inyectores seguirán expulsando la cantidad programada, por lo que habría un mal funcionamiento del motor.</p> <p>Se detiene el motor para evitar que por un mal funcionamiento del mismo pueda llegar a fallar.</p> <p>Daños valorados entre 200 mil y 1 millón de dólares.</p>	Crítico

Modo de fallo		Efecto sobre el equipo	Efecto sobre el sistema	Efecto sobre el buque	Severidad
1a10	Fallo del aftercooler.	No se transfiere el calor suficiente, no alcanzando el aire comprimido la temperatura idónea para un correcto funcionamiento.	No se refrigera de forma óptima el aire comprimido de admisión.	<p>El motor está programado para que en cada momento entre el aire comprimido y el combustible adecuado. Si el aire comprimido entra a la cámara de combustión con una temperatura mayor de la esperada, entrará una cantidad de masa menor de lo previsto, pero los inyectores seguirán expulsando la cantidad programada, por lo que habría un mal funcionamiento del motor.</p> <p>Se detiene el motor para evitar que por un mal funcionamiento del mismo pueda llegar a fallar.</p> <p>Daños valorados entre 200 mil y 1 millón de dólares.</p>	Crítico

Modo de fallo		Efecto sobre el equipo	Efecto sobre el sistema	Efecto sobre el buque	Severidad
1a11	Fallo del enfriador de combustible.	No se transfiere el calor suficiente, no alcanzando el combustible de retorno la temperatura idónea para un correcto funcionamiento. Pueden existir pérdidas de combustible así como de agua de mar.	No se refrigera de forma óptima el combustible de retorno.	Si el combustible de retorno no se enfría lo suficiente puede sobrecalentarse demasiado, produciendo la inflamación del mismo originando una explosión. Asimismo, si existe una pérdida del combustible hacia el exterior del intercambiador, el combustible puede llegar a inflamarse fuera de éste ocasionando una situación de alto riesgo para el buque y la dotación con posible pérdida de vidas humanas.	Catastrófico



Modo de fallo		Efecto sobre el equipo	Efecto sobre el sistema	Efecto sobre el buque	Severidad
1a12	Fallo de las tuberías o conexiones.	Pérdida de estanqueidad de las tuberías o conexiones provocando pérdidas de fluido.	Dependiendo de las tuberías y conexiones afectadas no llegará el caudal necesario al equipo correspondiente, no transfiriendo el calor suficiente, teniendo como consecuencia que el sistema de refrigeración no refrigera de forma adecuada el equipo pertinente: el combustible de retorno, el aire comprimido de admisión, el aceite de lubricación o las cámaras de combustión del motor a través de las camisas.	<p>Se detiene el motor para evitar que se pueda gripar o romper.</p> <p>Si el combustible de retorno no se enfría lo suficiente puede sobrecalentarse demasiado, produciendo la inflamación de la misma originando una explosión. Es una situación de alto riesgo para el buque y la dotación con posible pérdida de vidas humanas, pero hay sensores que al detectar una temperatura mayor de lo debido indican que se ha de parar el motor, disminuyendo la severidad del fallo de catastrófico a crítico.</p> <p>Daños valorados entre 200 mil y 1 millón de dólares.</p>	Crítico

Modo de fallo		Efecto sobre el equipo	Efecto sobre el sistema	Efecto sobre el buque	Severidad
1a13	Fallo del filtro.	Obstrucción del filtro impidiendo el paso del agua de mar.	Debido a la falta de caudal no se transfiere el calor suficiente a los fluidos de refrigeración, teniendo como consecuencia que el sistema de refrigeración no refrigera de forma adecuada todos los elementos que debe enfriar: el combustible de retorno, el aire comprimido de admisión, el aceite de lubricación y las cámaras de combustión del motor a través de las camisas.	<p>Se detiene el motor para evitar que se pueda gripar o romper.</p> <p>Si el combustible de retorno no se enfría lo suficiente puede sobrecalentarse demasiado, produciendo la inflamación de la misma originando una explosión. Es una situación de alto riesgo para el buque y la dotación con posible pérdida de vidas humanas, pero hay sensores que al detectar una temperatura mayor de lo debido indican que se ha de parar el motor, disminuyendo la severidad del fallo de catastrófico a crítico.</p> <p>Daños valorados entre 200 mil y 1 millón de dólares.</p>	Crítico

Modo de fallo		Efecto sobre el equipo	Efecto sobre el sistema	Efecto sobre el buque	Severidad
2a1	Fallo de la válvula de retención de la bomba de emergencia.	No se impide el paso del fluido hacia la bomba de emergencia.	Puede dañarse la bomba cuando sea necesaria arrancarla, no pudiendo bombear de forma óptima el fluido de refrigeración hacia el intercambiador de calor aceite de lubricación ni hacia las camisas del motor, por lo que no se refrigera total o parcialmente tanto el aceite de refrigeración como las camisas del motor.	Se detiene el motor para evitar que se pueda gripar o romper.  Daños valorados entre 200 mil y 1 millón de dólares.	Crítico

Modo de fallo		Efecto sobre el equipo	Efecto sobre el sistema	Efecto sobre el buque	Severidad
2a2	Fallo del filtro.	Rotura del filtro no impidiendo la entrada de elementos sólidos al sistema de refrigeración.	Daños en la bomba debido a los elementos sólidos, que puede ocasionar la rotura de la bomba o el mal funcionamiento de la misma, impidiendo bombear el caudal necesario de agua de mar para refrigerar todos los elementos que debe enfriar: el combustible de retorno, el aire comprimido de admisión, el aceite de lubricación y las cámaras de combustión del motor a través de las camisas.	<p>Se detiene el motor para evitar que se pueda gripar o romper.</p> <p>Si el combustible de retorno no se enfría lo suficiente puede sobrecalentarse demasiado, produciendo la inflamación de la misma originando una explosión. Es una situación de alto riesgo para el buque y la dotación con posible pérdida de vidas humanas, pero hay sensores que al detectar una temperatura mayor de lo debido indican que se ha de parar el motor, disminuyendo la severidad del fallo de catastrófico a crítico.</p> <p>Daños valorados entre 200 mil y 1 millón de dólares.</p>	Crítico

Modo de fallo		Efecto sobre el equipo	Efecto sobre el sistema	Efecto sobre el buque	Severidad
2a3	Fallo del tanque de expansión del circuito de baja temperatura.	No es capaz de proporcionar una presión positiva a la bomba del circuito de baja temperatura para evitar cavitación.	Daños de la bomba del circuito de baja temperatura debido a la cavitación, que puede ocasionar la rotura de la bomba o el mal funcionamiento de la misma, impidiendo bombear el caudal necesario de agua glicolada para refrigerar el aire comprimido de admisión.	Se detiene el motor para evitar que se pueda gripar o romper.  Daños valorados entre 200 mil y 1 millón de dólares.	Crítico

Modo de fallo		Efecto sobre el equipo	Efecto sobre el sistema	Efecto sobre el buque	Severidad
2a4	Fallo del tanque de expansión del circuito de alta temperatura.	No es capaz de proporcionar una presión positiva a la bomba del circuito de alta temperatura o a la bomba de emergencia para evitar cavitación.	Daños de la bomba del circuito de alta temperatura o de la bomba de emergencia debido a la cavitación, que puede ocasionar la rotura de la bomba o el mal funcionamiento de la misma, impidiendo bombear el caudal necesario de agua glicolada para refrigerar el aceite de lubricación y las cámaras de combustión del motor a través de las camisas.	Se detiene el motor para evitar que se pueda gripar o romper.  Daños valorados entre 200 mil y 1 millón de dólares.	Crítico

Modo de fallo		Efecto sobre el equipo	Efecto sobre el sistema	Efecto sobre el buque	Severidad
2b1	Fallo del tanque de expansión del circuito de baja temperatura.	Pérdida de estanqueidad del tanque de expansión del circuito de baja temperatura perdiendo fluido de refrigeración.	La protección de las tuberías ante sobrepresiones debido a la dilatación del fluido de refrigeración se sigue manteniendo, pero se pierde parte de dicho fluido. Si existe una gran pérdida de agua glicolada no hay caudal suficiente de fluido para una buena refrigeración del aire comprimido de admisión.	Se detiene el motor para evitar que se pueda gripar o romper.  Daños valorados entre 200 mil y 1 millón de dólares.	Crítico

Modo de fallo		Efecto sobre el equipo	Efecto sobre el sistema	Efecto sobre el buque	Severidad
2b2	Fallo del tanque de expansión del circuito de alta temperatura.	Pérdida de estanqueidad del tanque de expansión del circuito de alta temperatura perdiendo fluido de refrigeración.	La protección de las tuberías ante sobrepresiones debido a la dilatación del fluido de refrigeración se sigue manteniendo, pero se pierde parte de dicho fluido. Si existe una gran pérdida de agua glicolada no hay caudal suficiente de fluido para una buena refrigeración del aceite de lubricación y las cámaras de combustión del motor a través de las camisas.	Se detiene el motor para evitar que se pueda gripar o romper.  Daños valorados entre 200 mil y 1 millón de dólares.	Crítico



Modo de fallo		Efecto sobre el equipo	Efecto sobre el sistema	Efecto sobre el buque	Severidad
3a1	Fallo de la válvula del circuito de la bomba de emergencia.	No se puede abrir la válvula cuando falla la bomba del circuito de alta temperatura.	Si ha fallado la bomba del circuito de alta temperatura no se puede refrigerar ni el aceite de lubricación ni las cámaras de combustión a través de las camisas.	<p>En el caso de que haya fallado la bomba del circuito de alta temperatura, el motor no puede volver a ser arrancado al no poder abrirse la válvula y, por lo tanto, no se puede impulsar el agua glicolada mediante la bomba para la refrigeración del aceite de lubricación y las cámaras de combustión.</p> <p>Daños valorados entre 200 mil y 1 millón de dólares.</p>	Crítico

Modo de fallo		Efecto sobre el equipo	Efecto sobre el sistema	Efecto sobre el buque	Severidad
3a2	Fallo de la bomba de emergencia.	El equipo no bombea totalmente o con la presión necesaria para que llegue el caudal adecuado de agua glicolada al intercambiador de calor de aceite de lubricación ni a las camisas del motor.	Si la bomba del circuito de alta temperatura ha fallado, no se refrigera de forma óptima o totalmente ni el aceite de lubricación ni las cámaras de combustión.	Se detiene el motor para evitar que se pueda gripar o romper.  Daños valorados entre 200 mil y 1 millón de dólares.	Crítico
3a3	Fallo de la válvula de retención de la bomba de emergencia.	No se impide el paso del fluido hacia la bomba de emergencia.	Puede dañarse la bomba cuando sea necesaria arrancarla, no pudiendo bombear de forma óptima el fluido de refrigeración hacia el intercambiador de calor aceite de lubricación ni hacia las camisas del motor, por lo que no se refrigera total o parcialmente tanto el aceite de lubricación como las camisas del motor.	Se detiene el motor para evitar que se pueda gripar o romper.  Daños valorados entre 200 mil y 1 millón de dólares.	Crítico

Modo de fallo		Efecto sobre el equipo	Efecto sobre el sistema	Efecto sobre el buque	Severidad
4a1	Fallo de la válvula de entrada del intercambiador de calor de baja temperatura.	No se puede cerrar la válvula para aislar el intercambiador de calor de baja temperatura cuando se quiere realizar labores de mantenimiento.	Sólo afecta a las labores de mantenimiento no afectando a la operatividad del sistema.	Al no afectar a la operatividad del sistema los efectos sobre el buque son mínimos.  Daños valorados entre 2 y 10 mil dólares.	Despreciable
4a2	Fallo de la válvula de salida del intercambiador de calor de baja temperatura o de entrada del intercambiador de alta temperatura.	No se puede cerrar la válvula para aislar el intercambiador de calor de baja temperatura y el intercambiador de alta temperatura cuando se quiere realizar labores de mantenimiento.	Sólo afecta a las labores de mantenimiento no afectando a la operatividad del sistema.	Al no afectar a la operatividad del sistema los efectos sobre el buque son mínimos.  Daños valorados entre 2 y 10 mil dólares.	Despreciable

Modo de fallo		Efecto sobre el equipo	Efecto sobre el sistema	Efecto sobre el buque	Severidad
4a3	Fallo de la válvula de salida del intercambiador de calor de alta temperatura.	No se puede cerrar la válvula para aislar el intercambiador de calor de alta temperatura cuando se quiere realizar labores de mantenimiento.	Sólo afecta a las labores de mantenimiento no afectando a la operatividad del sistema.	Al no afectar a la operatividad del sistema los efectos sobre el buque son mínimos.  Daños valorados entre 2 y 10 mil dólares.	Despreciable
4a4	Fallo de la válvula de entrada del enfriador de combustible.	No se puede cerrar la válvula para aislar el enfriador de combustible cuando se quiere realizar labores de mantenimiento.	Sólo afecta a las labores de mantenimiento no afectando a la operatividad del sistema.	Al no afectar a la operatividad del sistema los efectos sobre el buque son mínimos.  Daños valorados entre 2 y 10 mil dólares.	Despreciable
4a5	Fallo de la válvula de salida del enfriador de combustible.	No se puede cerrar la válvula para aislar el enfriador de combustible cuando se quiere realizar labores de mantenimiento.	Sólo afecta a las labores de mantenimiento no afectando a la operatividad del sistema.	Al no afectar a la operatividad del sistema los efectos sobre el buque son mínimos.  Daños valorados entre 2 y 10 mil dólares.	Despreciable

### 6.1.4 Procedimiento de obtención del riesgo

Tras la realización de los efectos sobre el equipo, sistema y buque así como la determinación de la severidad de cada modo de fallo, se ha de calcular la probabilidad de que ocurra el fallo para poder establecer el riesgo mediante la matriz de criticidad. Se divide en cinco niveles diferentes las probabilidades de fallo, asignando a cada nivel un intervalo de probabilidad de fallo o tasa instantánea de fallos ( $\lambda(t)$ ) numérico, que son los siguientes:

- Frecuente:  $1 \cdot 10^{-1} \leq \lambda(t) \leq 1$ .
- Probable:  $1 \cdot 10^{-2} \leq \lambda(t) \leq 1 \cdot 10^{-1}$ .
- Ocasional:  $1 \cdot 10^{-3} \leq \lambda(t) \leq 1 \cdot 10^{-2}$ .
- Remoto:  $1 \cdot 10^{-6} \leq \lambda(t) \leq 1 \cdot 10^{-3}$ .
- Improbable:  $0 \leq \lambda(t) \leq 1 \cdot 10^{-6}$ .

Una vez se tiene tanto la severidad como la probabilidad de ocurrencia de un fallo se obtiene el riesgo mediante la matriz de criticidad.

Los equipos siguen la distribución de Weibull cuya tasa instantánea de fallos  $\lambda(t)$  se calcula de la siguiente manera:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left[ \frac{(t-\gamma)}{\eta} \right]^{\beta-1} \text{ (ecuación 7.1.4.1)}$$

Donde:

- $\lambda(t)$  = Tasa instantánea de fallos.
- $t$  = Es el intervalo de tiempo en el cual se desea conocer la fiabilidad del equipo, partiendo de un periodo del instante  $t=0$ .
- $\gamma$  = Parámetro de origen.
- $\beta$  = El parámetro de forma que, según la distribución de Weibull, relaciona el periodo de tiempo en el que se encuentra operando el equipo y el comportamiento del mismo ante la probabilidad de ocurrencia de fallos.
- $\eta$  = Parámetro de escala.

A cada equipo se le ajusta mejor un parámetro de forma ( $\beta$ ) de la distribución de Weibull según el patrón de fallo que tenga cada uno.

Las bombas son equipos dinámicos (rotativos) cuyo parámetro de forma ( $\beta$ ) de la distribución de Weibull que mejor se le ajusta es el  $\beta=2$ , debido a que muestra una probabilidad de fallo creciente de forma gradual, siendo el patrón de fallo que se muestra a continuación el que mejor se ajusta a dicho equipo:

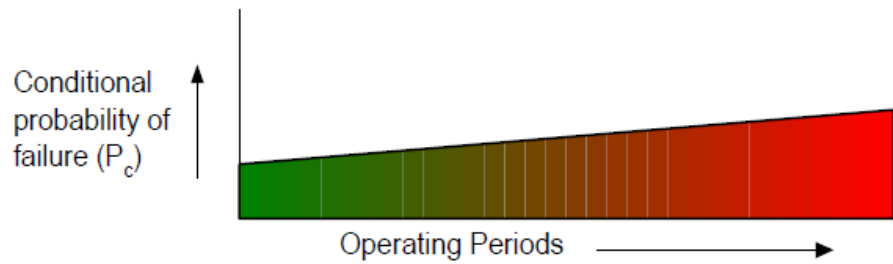


Figura 24: Patrón de fallo de los equipos dinámicos de la instalación [9]

Para hallar  $\lambda(t)$  hay que conocer el valor de  $\eta$  donde el *Instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo del Ministerio de trabajo y asuntos sociales España* relaciona  $\beta$  con el cociente entre el MTBF y  $\eta$ . Dicha relación se muestra en la siguiente tabla:

LEY DE WEIBULL:

$$R(t) = 1 - F(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t}{\eta} \right)^\beta \right]$$

$$MTBF = m = E(t) = \eta \Gamma \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right)$$

$$\sigma^2 = \eta^2 \left[ \Gamma \left( 1 + \frac{2}{\beta} \right) - \Gamma^2 \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right) \right]$$

$\beta$	$m/\eta = \Gamma(1+1/\beta)$	$\sigma/\eta$	$\beta$	$m/\eta = \Gamma(1+1/\beta)$	$\sigma/\eta$
0	$\infty$	$\infty$	2,0	0,8862	0,463
0,1	10!	$\sqrt{20! - (10!)^2}$	2,1	0,8857	0,44
0,2	120	1901	2,2	0,8856	0,42
0,3	9,2605	47	2,3	0,8859	0,41
0,4	3,3234	10,43	2,4	0,8865	0,39
0,5	2,0000	4,472	2,5	0,8873	0,38
0,6	1,5046	2,645	2,6	0,8882	0,37
0,7	1,2658	1,851	2,7	0,8893	0,36
0,8	1,1330	1,428	2,8	0,8905	0,34
0,9	1,0522	1,171	2,9	0,8917	0,33
1,0	1,0000	1,000	3,0	0,8938	0,32
1,1	0,9649	0,878	3,1	0,8943	0,315
1,2	0,9407	0,785	3,2	0,8957	0,31
1,3	0,9235	0,716	3,3	0,8970	0,30
1,4	0,9114	0,659	3,4	0,8984	0,29
1,5	0,9028	0,613	3,5	0,8998	0,28
1,6	0,8966	0,594	3,6	0,9011	0,27
1,7	0,8922	0,530	3,8	0,9038	0,26
1,8	0,8893	0,512	4,0	0,9064	0,25
1,9	0,8874	0,486			

Tabla 10: Relación entre  $\beta$  y  $\frac{MTBF}{\eta}$  [23]

En la tabla se muestra que para un valor de  $\beta=2$  el cociente entre el MTBF y  $\eta$  es:

- $\frac{MTBF}{\eta} = 0,8862$

Una vez despejado  $\eta$  se introduce éste en la ecuación de  $\lambda(t)$  junto con el valor de  $\beta$ , el valor de  $\eta$ , y con un valor de  $\gamma=0$ , quedando  $\lambda(t)$  de la siguiente manera tras realizar las operaciones oportunas:

- $\lambda(t) = \frac{1,5707 \cdot t}{MTBF^2} \quad (13)$

El resto de los equipos de la instalación son estáticos, siendo el parámetro de forma de la distribución de Weibull más adecuado igual a 3,5. El patrón de fallo que mejor se ajusta a dichos equipos es el siguiente:

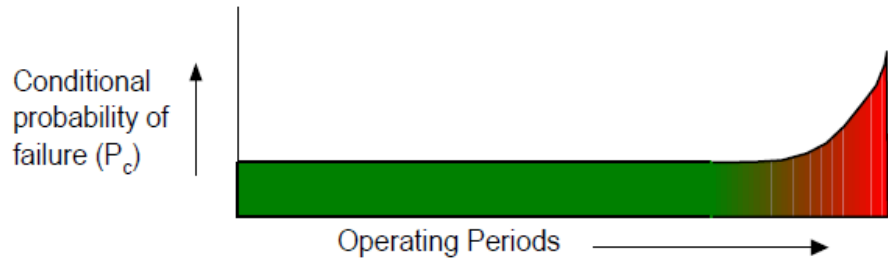


Figura 25: Patrón de fallo de los equipos estáticos de la instalación [9]

En la Tabla 10 se muestra el valor del cociente entre el MTBF y  $\eta$  cuando  $\beta=3,5$ :

- $\frac{MTBF}{\eta} = 0,8998$

Se despeja  $\eta$  y se inserta  $\beta=3,5$ ,  $\gamma=0$ , el valor de  $\eta$  y, realizando las operaciones oportunas la tasa instantánea de fallos  $\lambda(t)$  resultante es:

- $\lambda(t) = \frac{3,1493}{MTBF} \cdot \left( \frac{t \cdot 0,8998}{MTBF} \right)^{2,5} \quad (14)$

Cuando se realicen los cálculos de  $\lambda(t)$  de cada modo de fallo se tendrá en cuenta el valor de  $\beta$  del equipo para la utilización de unas u otras ecuaciones.

Se va a proceder a la determinación del riesgo de cada modo de fallo mediante una tabla que muestra el modo de fallo, la severidad, el MTBF, la fuente de donde se ha obtenido la información del MTBF,  $\lambda(t)$ , el riesgo (que se obtiene de la matriz de criticidad con los datos de la severidad del modo de fallo y  $\lambda(t)$ ) y el valor de  $\beta$  que mejor se ajusta a dicho modo de fallo.

A continuación se muestra la tabla mencionada anteriormente para la obtención del riesgo de cada modo de fallo:



Modo de fallo		Severidad	MTBF (h)	Fuente de información MTBF	$\lambda(t)$ ( $10^{-5}$ )	Riesgo	$\beta$
1a1	Fallo de la bomba de agua de mar.	Crítico	80.000	Pompe Garbarino	0,89	Medio	2
1a2	Fallo del intercambiador de calor de baja temperatura.	Crítico	26.500	Alfa Laval	3,25	Medio	3,5
1a3	Fallo del intercambiador de calor de alta temperatura.	Crítico	26.500	Alfa Laval	3,25	Medio	3,5
1a4	Fallo de la válvula termostática del circuito de alta temperatura.	Crítico	26.540	Sart Von Rorh	3,24	Medio	3,5
1a5	Fallo de la bomba del circuito de alta temperatura.	Marginal	80.000	Pompe Garbarino	0,89	Medio	2
1a6	Fallo del intercambiador de calor aceite de lubricación.	Crítico	22.348	Alfa Laval	3,85	Medio	3,5
1a7	Fallo de las camisas del motor diésel.	Crítico	120.000	Caterpillar	0,72	Medio	3,5

Modo de fallo		Severidad	MTBF (h)	Fuente de información MTBF	$\lambda(t)$ ( $10^{-5}$ )	Riesgo	$\beta$
1a8	Fallo de la válvula termostática del circuito de baja temperatura.	Crítico	26.540	Sart Von Rorh	3,24	Medio	3,5
1a9	Fallo de la bomba del circuito de baja temperatura.	Crítico	80.000	Pompe Garbarino	0,89	Medio	2
1a10	Fallo del aftercooler.	Crítico	22.348	Alfa Laval	3,85	Medio	3,5
1a11	Fallo del enfriador de combustible.	Catastrófico	26.500	Alfa Laval	1,42	Alto	3,5
1a12	Fallo de las tuberías o conexiones.	Crítico	50.000	García e hijos	1,72	Medio	3,5
1a13	Fallo del filtro.	Crítico	17.000	HECISA	5,06	Medio	3,5
2a1	Fallo de la válvula de retención de la bomba de emergencia.	Crítico	35.765	Thompson	2,41	Medio	3,5
2a2	Fallo del filtro.	Crítico	17.000	HECISA	5,06	Medio	3,5

Modo de fallo		Severidad	MTBF (h)	Fuente de información MTBF	$\lambda(t)$ ( $10^{-5}$ )	Riesgo	$\beta$
2a3	Fallo del tanque de expansión del circuito de baja temperatura.	Crítico	48.634	Enwesa	1,77	Medio	3,5
2a4	Fallo del tanque de expansión del circuito de alta temperatura.	Crítico	48.634	Enwesa	1,77	Medio	3,5
2b1	Fallo del tanque de expansión del circuito de baja temperatura.	Crítico	48.634	Enwesa	1,77	Medio	3,5
2b2	Fallo del tanque de expansión del circuito de alta temperatura.	Crítico	48.634	Enwesa	1,77	Medio	3,5
3a1	Fallo de la válvula del circuito de la bomba de emergencia.	Crítico	28.125	Truflo	3,06	Medio	3,5
3a2	Fallo de la bomba de emergencia.	Crítico	80.000	Pompe Garbarino	0,89	Medio	2
3a3	Fallo de la válvula de retención de la bomba de emergencia.	Crítico	35.765	Thompson	2,41	Medio	3,5

Modo de fallo		Severidad	MTBF (h)	Fuente de información MTBF	$\lambda(t)$ ( $10^{-5}$ )	Riesgo	$\beta$
4a1	Fallo de la válvula de entrada del intercambiador de calor de baja temperatura.	Despreciable	32.765	Truflo	3,95	Bajo	3,5
4a2	Fallo de la válvula de salida del intercambiador de calor de baja temperatura o de entrada del intercambiador de alta temperatura.	Despreciable	32.765	Truflo	3,95	Bajo	3,5
4a3	Fallo de la válvula de salida del intercambiador de calor de alta temperatura.	Despreciable	32.765	Truflo	3,95	Bajo	3,5
4a4	Fallo de la válvula de entrada del enfriador de combustible.	Despreciable	32.765	Truflo	3,95	Bajo	3,5
4a5	Fallo de la válvula de salida del enfriador de combustible.	Despreciable	32.765	Truflo	3,95	Bajo	3,5

## 7. Selección de tareas

Una vez realizado el FMECA se analizan las diferentes acciones que se pueden llevar a cabo en cada equipo seleccionando las que mejor se adecúen en cada caso. Las acciones que se pueden realizar en los equipos son las siguientes:

- Tareas predictivas.
- Tareas preventivas.
- Tareas de búsqueda de fallos ocultos.
- Permitir el fallo.
- Rediseño.

Para la elección de qué acciones hay que realizar a cada equipo hay que tener en cuenta diversos factores como pueden ser la evidencia del fallo (si es visible u oculto), los costes del mantenimiento de dicho equipo en comparación con los daños ocasionados si se permite el fallo o si al realizar las tareas de mantenimiento se reduce la probabilidad de fallo a niveles aceptables.

Tras la elección de las acciones que se van a realizar en cada equipo se decide la frecuencia de las mismas. Para ello hay que tener en consideración el riesgo asociado a cada modo de fallo, el MTBF, las especificaciones del fabricante y el calendario de inmovilizaciones programadas del buque.

Las especificaciones del fabricante adquieren gran importancia ya que si se obvian los periodos de realización de las tareas que recomienda y el equipo sufre una avería, las reparaciones que realice el fabricante no entrarían en la garantía que proporciona éste debido a que han sido incumplidas sus recomendaciones.

La relevancia del calendario de inmovilizaciones programadas del buque es debido a que ciertas labores de mantenimiento solamente se pueden realizar cuando el buque está inmovilizado o en varada, por lo que es necesario ajustar determinadas tareas a dichas inmovilizaciones, siempre y cuando se hayan tenido en cuenta también el riesgo asociado al modo de fallo, el MTBF y las recomendaciones del fabricante. El calendario de inmovilizaciones programadas del buque es el siguiente:

## Mantenimiento RCM del sistema de refrigeración del motor diésel de un buque

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1 <sup>er</sup> Año																										
	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
2 <sup>o</sup> Año	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78
	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104
3 <sup>er</sup> Año																										
	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130
4 <sup>o</sup> Año	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156
	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182
5 <sup>o</sup> Año																										
	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208
6 <sup>o</sup> Año	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234
	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260
7 <sup>o</sup> Año																										
	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286
8 <sup>o</sup> Año	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312
	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338
9 <sup>o</sup> Año																										
	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364
9 <sup>o</sup> Año	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390
	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416
9 <sup>o</sup> Año																										
	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442
9 <sup>o</sup> Año	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468



Inmovilizaciones programadas

El motor del buque, y en consecuencia el sistema de refrigeración del motor, se encuentra en funcionamiento durante el 40 % del tiempo. Todos los equipos del sistema de refrigeración están en funcionamiento dicho 40 % del tiempo exceptuando los equipos pertenecientes al circuito de emergencia (bomba de emergencia, válvula del circuito de la bomba de emergencia y válvula de retención de la bomba de emergencia) cuyo porcentaje de utilización es del 5 % y las válvulas de mantenimiento que son utilizadas el 10 % del tiempo.

Se ha realizado una tabla donde se aprecia el tiempo real de funcionamiento de cada equipo (en horas), en los periodos de inmovilizaciones programadas, dependiendo del porcentaje de utilización.

Periodo		% Utilización		
		40 %	5 %	10 %
Años	Semanas	(h)	(h)	(h)
1	52	3.504	438	876
2	104	7.008	876	1.752
3	156	10.512	1.314	2.628
4	208	14.016	1.752	3.504
5	260	17.520	2.190	4.380
6	312	21.024	2.628	5.256
7	364	24.528	3.066	6.132
8	416	28.032	3.504	7.008

Tabla 11: Tiempo de funcionamiento de los equipos según el porcentaje de utilización

A continuación, se van a mostrar las tareas de mantenimiento que se van a realizar a los equipos, así como la frecuencia, el número de personas necesarias (las tareas pueden ser

realizadas por la dotación del buque o por especialistas), horas empleadas, recomendaciones del fabricante (si las hubiera) o si la tarea ha sido propuesta por el grupo de trabajo.

Se van a describir las acciones que se han de realizar en cada tarea, pero no se va a entrar en detalle sobre cómo llevar a cabo dicha tarea. Los detalles sobre qué herramientas utilizar, y los pasos a seguir para la realización de la tarea lo llevará a cabo el jefe de mantenimiento una vez se hayan establecido todas las tareas que se han de efectuar.

Se van a unir las tareas de equipos iguales con diferente función pero con el mismo MTBF y riesgo ya que no existe ninguna razón a priori para que el mantenimiento a realizar difiera, ya que todas las características tanto de los equipos como las que han de cumplir éstos son exactamente las mismas.

Conocer la influencia de cada tarea en el aumento de la fiabilidad es muy complicado, por lo que se ha de trabajar sobre una hipótesis que se aproxime lo máximo posible a la realidad, siendo ésta coherente y que asegure que el equipo se encuentra en el lado de la seguridad. Por ello, se ha decidido que el plan de mantenimiento se base en la hipótesis de que una vez se realice la última tarea del plan de mantenimiento de un equipo, la fiabilidad de dicho equipo vuelva a ser del 100 %, comenzando de nuevo el plan de mantenimiento de éste. Con dicha hipótesis se asegura que el equipo se encuentra en todo momento en el lado de la seguridad ya que no se tiene en cuenta el aumento de la fiabilidad de todas las tareas previas a la última. El único caso en el que podría haber duda sería tras la realización de la última tarea ya que se aumenta la fiabilidad hasta el 100 %, que en la mayoría de los casos dicho aumento sería mayor que el real pero que se ve compensado con el hecho de que en todas las tareas previas no se ha tenido en cuenta la influencia de éstas sobre la fiabilidad.



## 7.1 Bomba de agua de mar, bomba del circuito de alta temperatura y bomba del circuito de baja temperatura

Tarea		Frecuencia	Dotación (nº x h)	Especialista (nº x h)	Fabricante	Grupo de trabajo
1	Inspeccionar la bomba verificando que no existan vibraciones excesivas o ruidos anormales, que no existan pérdidas de agua en el cuerpo de la bomba o en las conexiones de entrada de los tubos de aspiración y descarga y limpiar las superficies externas de la bomba.	Diaria	1 x 0,1		Diaria	
2	Toma de vibraciones del conjunto de la bomba.	Tres meses antes de cada inmovilización	1 x 1			Tres meses antes de cada inmovilización
3	Análisis de vibraciones del conjunto de la bomba.	Tres meses antes de cada inmovilización		1 x 0,25		Tres meses antes de cada inmovilización

Tarea		Frecuencia	Dotación (nº x h)	Especialista (nº x h)	Fabricante	Grupo de trabajo
4	Inspeccionar los dispositivos antivibración de la bomba: Limpieza de la superficie externa de los dispositivos, verificar que las alturas de los dispositivos no sean inferior a 89 mm, apretar los tornillos de fijación de los dispositivos antivibración. Sustitución de piezas en caso necesario.	Anual	1 x 0,25		Anual	
5	Revisión completa de la bomba.	8 años	1 x 3	1 x 3	30.000 h	

## 7.2 Intercambiador de calor de baja temperatura e Intercambiador de calor de alta temperatura

Tarea		Frecuencia	Dotación (nº x h)	Especialista (nº x h)	Fabricante	Grupo de trabajo
1	Verificación pérdida de carga circuito en un banco de ensayo donde se puedan medir las presiones en los puntos de entrada y salida de cada línea de fluido, y analizar el comportamiento del intercambiador, sobre todo en cuanto a estanqueidad se refiere. En caso de pérdida de carga anormal, proceder a la limpieza del equipo.	Semanal	1 x 0,2		Semanal	
2	Inspección visual del equipo verificando que no haya corrosión, grietas o deterioros. Si se detecta algún elemento dañado proceder a su reemplazo. Sustitución de juntas y frisas en las conexiones del intercambiador con la instalación y limpieza del equipo.	5 años		1 x 1	Seis años o 18.000 h de funcionamiento desde puesta en marcha	

### 7.3 Enfriador de combustible

Tarea		Frecuencia	Dotación (nº x h)	Especialista (nº x h)	Fabricante	Grupo de trabajo
1	Verificación pérdida de carga circuito en un banco de ensayo donde se puedan medir las presiones en los puntos de entrada y salida de cada línea de fluido, y analizar el comportamiento del intercambiador, sobre todo en cuanto a estanqueidad se refiere. En caso de pérdida de carga anormal, proceder a la limpieza del equipo.	Semanal	1 x 0,2		Semanal	
2	Inspección visual del equipo verificando que no haya corrosión, grietas o deterioros. Si se detecta algún elemento dañado proceder a su reemplazo. Sustitución de juntas y frisas en las conexiones del intercambiador con la instalación y limpieza del equipo.	3 años		1 x 1	Seis años o 18.000 h de funcionamiento desde puesta en marcha	

## 7.4 Filtro

Tarea		Frecuencia	Dotación (nº x h)	Especialista (nº x h)	Fabricante	Grupo de trabajo
1	Verificar el estado del elemento filtrante, y sustitución en caso necesario.	Anual	1 x 0,25		4.000 h	
2	Verificar desgaste de las cuchillas de limpieza, realizar aproximación si es necesario y sustituir las cuchillas cuando el desgaste impida realizar aproximación.	Anual	1 x 0,25		4.000 h	
3	Verificar el estado de las juntas de estanqueidad cada vez que se abra el filtro. Comprobar que las juntas están introducidas en sus alojamientos y que no están deformadas.	Cuando se abra el filtro	1 x 0,25			Cada vez que se abra el filtro
4	Supervisión y análisis de los valores de presión del filtro. Cuando se observe una pérdida de carga de 0,5 bares dar una vuelta de volante con el fin de mantener el filtro limpio.	Diaria	1 x 0,1			Diaria

## 7.5 Intercambiador de calor aceite de lubricación y aftercooler

Tarea		Frecuencia	Dotación (nº x h)	Especialista (nº x h)	Fabricante	Grupo de trabajo
1	Inspección visual verificando que no haya corrosión y limpieza de las placas, del haz tubular y del cuerpo del intercambiador.	Anual		2 x 1	Anual	
2	Prueba de estanqueidad.	Anual		2 x 0,5	Anual	
3	Inspección general donde se realizan las siguientes tareas: inspección visual verificando que no haya corrosión, limpieza de las placas, del haz tubular y del cuerpo del intercambiador, prueba de estanqueidad, control de espesor de todos los tubos, sustitución de las juntas y prueba de resistencia.	4 años		2 x 4	5 años	

## 7.6 Tanque de expansión del circuito de baja temperatura y tanque de expansión del circuito de alta temperatura

Tarea		Frecuencia	Dotación (nº x h)	Especialista (nº x h)	Fabricante	Grupo de trabajo
1	Comprobación del nivel de refrigerante a través del indicador óptico de nivel.	Diaria	1 x 0,02			Diaria
2	Inspección de grietas superficiales y comprobación del estado de los pernos de fijación del tanque de expansión así como del nivel óptico.	Anual	1 x 0,25		No especifica periodicidad	

### 7.7 Válvula termostática del circuito de alta temperatura y válvula termostática del circuito de baja temperatura

Tarea		Frecuencia	Dotación (nº x h)	Especialista (nº x h)	Fabricante	Grupo de trabajo
1	Limpieza de la válvula termostática.	Anual		1 x 1	Anual	
3	Comprobación del estado de la junta. Sustitución en caso necesario.	Anual	1 x 0,25		Anual	
3	Revisión completa de la válvula termostática.	5 años		1 x 2	6 años	



## 7.8 Tuberías y conexiones

Tarea		Frecuencia	Dotación (nº x h)	Especialista (nº x h)	Fabricante	Grupo de trabajo
1	Supervisión y análisis de los valores de presión de las tuberías. Cuando se observen presiones anómalas inspeccionar el tramo de tuberías afectado para detectar el motivo de dicha anomalía.	Diaria	1 x 0,1			Diaria
2	Inspección visual de las tuberías y conexiones verificando que no existen grietas, fugas o corrosión.	Semanal	1 x 0,2			Semanal
3	Revisión completa de las tuberías y conexiones inspeccionando exhaustivamente el estado de éstas. Sustitución de piezas en caso necesario.	8 años		2 x 8		8 años

### 7.9 Válvula de retención de la bomba de emergencia, válvula del circuito de la bomba de emergencia y bomba de emergencia

Tarea de búsqueda de fallos ocultos		Frecuencia	Dotación (nº x h)	Especialista (nº x h)	Fabricante	Grupo de trabajo
1	Pruebas de funcionamiento e inspección visual de la válvula de retención de la bomba de emergencia, la válvula del circuito de la bomba de emergencia y la bomba de emergencia.	Anual	1 x 0,5			Anual

## 7.10 Válvulas de mantenimiento

Tarea		Frecuencia	Dotación (nº x h)	Especialista (nº x h)	Fabricante	Grupo de trabajo
1	PERMITIR EL FALLO. No se realizarán tareas ya que los costes de mantenimiento serían mayores que los costes del fallo de alguno de los equipos, debido a que el fallo no afecta a la operatividad (sólo afecta a las labores de mantenimiento). El fallo que se considera es el de no poder abrir o cerrar alguna de las válvulas. El fallo que implica la pérdida de estanqueidad se controla con la tarea de inspecciones visuales de las tuberías y conexiones.					

### 7.11 Camisas del motor diésel

Tarea		Frecuencia	Dotación (nº x h)	Especialista (nº x h)	Fabricante	Grupo de trabajo
1	NO SE HARÁ MANTENIMIENTO. Aunque las camisas del motor diésel pertenezcan al sistema de refrigeración, las tareas de mantenimiento se harán junto con las del motor debido a que para realizar cualquier labor de mantenimiento de las camisas se necesita desmontar el motor, por lo que las tareas, horas empleadas y el coste se verá reflejado en el plan de mantenimiento del grupo de trabajo que se encargue del mantenimiento del motor.					

## 8. Presupuesto

La realización de los costes totales del mantenimiento se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$CTM = CRCM \text{ (ecuación 9.1)}$$

Donde:

CTM= Costes totales mantenimiento.

CRCM= Costes del mantenimiento RCM.

Los costes del mantenimiento RCM se dividen en los costes de la mano de obra y en los costes de los recursos utilizados como pueden ser el uso de herramientas, cambios de piezas, etc. que se engloba en el término denominado costes varios:

$$CRCM = CMO + CV \text{ (ecuación 9.2)}$$

Donde:

CMO= Costes de la mano de obra.

CV= Costes varios.

A su vez los costes de la mano de obra se divide en los costes de las horas realizadas por la dotación encargada del mantenimiento del buque y las horas realizadas por los especialistas de mantenimiento efectuado en puerto fuera del mar. El coste horario de la dotación es de 10 euros la hora mientras que el coste horario de los especialistas es de 40 euros la hora:

$$CMO = \text{Horas Dot.} \times C.\text{Horario Dot.} + \text{Horas Esp.} \times C.\text{Horario Esp.} \quad \text{(ecuación 9.3)}$$

Donde:

Horas Dot.= Horas dotación.

C. Horario Dot.= Coste horario dotación (10 €/h).

Horas Esp.= Horas especialista.

C. Horario Esp.= Coste horario especialista (40 €/h).

## Bombas

(Bomba de agua de mar, del circuito de alta temperatura y de baja temperatura)

MANO DE OBRA			
	Horas <sup>A</sup>	Coste <sup>B</sup>	Total
-Tarea 1	273/0	2730/0	2730
-Tarea 2	0/2	0/80	80
-Tarea 3	8/0	80/0	80
-Tarea 4	2/0	20/0	20
-Tarea 5	3/3	30/120	150
		Total	3060
Total coste mano de obra (3 ud.)			9180

VARIOS		
		Total
Herramientas, cambio de piezas, etc.		100
	Total varios (3 ud.)	300

**TOTAL 9480**

A: Horas dotación/ Horas especialista

B: Coste dotación/ Coste especialista

NOTA: Todos los costes son en euros

## Intercambiadores de placas

(Intercambiador de calor de baja temperatura y de alta temperatura)

MANO DE OBRA			
	Horas <sup>A</sup>	Coste <sup>B</sup>	Total
-Tarea 1	78/0	780/0	780
-Tarea 2	0/1	0/40	40
		Total	820
	Total coste mano de obra (2 ud.)		1640

VARIOS		
		Total
Herramientas, cambio de piezas, etc.		75
	Total varios (2 ud.)	150

**TOTAL 1790**

A: Horas dotación / Horas especialista

B: Coste dotación / Coste especialista

NOTA: Todos los costes son en euros



## Intercambiadores de placas

(Enfriador de combustible)

MANO DE OBRA			
	Horas <sup>A</sup>	Coste <sup>B</sup>	Total
-Tarea 1	78/0	780/0	780
-Tarea 2	0/2	0/80	80
		Total	860
	Total coste mano de obra (1 ud.)		860

VARIOS	
	Total
Herramientas, cambio de piezas, etc.	125
	Total varios (1 ud.) 125

**TOTAL 985**

A: Horas dotación / Horas especialista

B: Coste dotación / Coste especialista

NOTA: Todos los costes son en euros

## Filtro

MANO DE OBRA			
	Horas <sup>A</sup>	Coste <sup>B</sup>	Total
-Tarea 1	2/0	20/0	20
-Tarea 2	2/0	20/0	20
-Tarea 3	2/0	20/0	20
-Tarea 4	273/0	2730/0	2730
	Total		2790
	Total coste mano de obra (1 ud.)		2790

VARIOS		
		Total
Herramientas, cambio de piezas, etc.		225
	Total varios (1 ud.)	225

**TOTAL 3015**

A: Horas dotación / Horas especialista

B: Coste dotación / Coste especialista

NOTA: Todos los costes son en euros

## Intercambiadores tubo-carcasa (Enfriador de aceite y aftercooler)

MANO DE OBRA			
	Horas <sup>A</sup>	Coste <sup>B</sup>	Total
-Tarea 1	0/16	0/640	640
-Tarea 2	0/8	0/320	320
-Tarea 3	0/16	0/640	640
		Total	1600
Total coste mano de obra (2 ud.)			3200

VARIOS		
		Total
Herramientas, cambio de piezas, etc.		150
	Total varios (2 ud.)	300

**TOTAL 3500**

A: Horas dotación / Horas especialista

B: Coste dotación / Coste especialista

NOTA: Todos los costes son en euros

## Tanques de expansión

(Tanque de expansión del circuito de baja temperatura y de alta temperatura)

MANO DE OBRA			
	Horas <sup>A</sup>	Coste <sup>B</sup>	Total
-Tarea 1	54,6/0	546/0	546
-Tarea 2	2/0	20/0	20
		Total	566
	Total coste mano de obra (2 ud.)		1132

VARIOS	
	Total
Herramientas, cambio de piezas, etc.	50
	Total varios (2 ud.)
	100

**TOTAL 1232**

A: Horas dotación / Horas especialista

B: Coste dotación / Coste especialista

NOTA: Todos los costes son en euros

## Válvulas termostáticas

(Válvula termostática del circuito de alta temperatura y de baja temperatura)

MANO DE OBRA			
	Horas <sup>A</sup>	Coste <sup>B</sup>	Total
-Tarea 1	0/8	0/320	320
-Tarea 2	2/0	20/0	20
-Tarea 3	0/2	0/80	80
		Total	420
Total coste mano de obra (2 ud.)			840

VARIOS	
	Total
Herramientas, cambio de piezas, etc.	15
	Total varios (2 ud.) 30

**TOTAL 870**

A: Horas dotación / Horas especialista

B: Coste dotación / Coste especialista

NOTA: Todos los costes son en euros

## Tuberías y conexiones

MANO DE OBRA			
	Horas <sup>A</sup>	Coste <sup>B</sup>	Total
-Tarea 1	273/0	2730/0	2730
-Tarea 2	78/0	780/0	780
-Tarea 3	0/16	0/640	640
		Total	4150
Total coste mano de obra (1 ud.)			4150

VARIOS	
	Total
Herramientas, cambio de piezas, etc.	80
	Total varios (1 ud.) 80

**TOTAL 4230**

A: Horas dotación / Horas especialista

B: Coste dotación / Coste especialista

NOTA: Todos los costes son en euros

## Circuito de emergencia

(Bomba de emergencia, válvula de retención y válvula del circuito de emergencia)

MANO DE OBRA			
	Horas <sup>A</sup>	Coste <sup>B</sup>	Total
-Tarea 1	4/0	40/0	40
		Total	40
	Total coste mano de obra (1 ud.)		40

VARIOS			
			Total
Herramientas, cambio de piezas, etc.			50
	Total varios (1 ud.)		50

**TOTAL 90**

A: Horas dotación / Horas especialista

B: Coste dotación / Coste especialista

NOTA: Todos los costes son en euros

## Tabla resumen presupuesto

Equipos	Mano de obra	Coste varios	Total
-Bomba de agua de mar -Bomba del circuito de alta temperatura -Bomba del circuito de baja temperatura	9180	300	9840
-Intercambiador de calor de baja temperatura -Intercambiador de calor de alta temperatura	1640	150	1790
-Enfriador de combustible	860	125	985
-Filtro	2790	225	3015
-Enfriador de aceite -Aftercooler	3200	300	3500
-Tanque de expansión del circuito de baja temperatura -Tanque de expansión del circuito de alta temperatura	1132	100	1232
-Válvula termostática del circuito de alta temperatura -Válvula termostática del circuito de baja temperatura	840	30	870
-Tuberías y conexiones	4150	80	4230
-Bomba de emergencia -Válvula de retención -Válvula del circuito de emergencia	40	50	90
<b>TOTAL</b>	<b>23832</b>	<b>1360</b>	<b>25192</b>

NOTA: Todos los costes son en euros



Asciende el presente presupuesto de la realización del proyecto Mantenimiento RCM del sistema de refrigeración del motor diesel de un buque a la cantidad de veinticinco mil ciento noventa y dos euros (IVA no incluido).

Madrid, Febrero de 2014

Raúl Mora de Céspedes

## 9. Conclusiones

No existe un mantenimiento que sea el mejor bajo todas las circunstancias respecto a las otras existentes. Dependiendo de la instalación y de su importancia en cuanto a seguridad, medioambiente y calidad será mejor aplicar uno u otro método de mantenimiento. Por ello, hay que realizar un estudio previo.

Para el sistema de refrigeración al cual se le va a realizar el mantenimiento, el mantenimiento que mejor se adecúa es el método RCM. Esto es debido a que en dicha instalación adquiere vital importancia la seguridad, ya que es un sistema de refrigeración de un motor marino de un buque. Como se ha mencionado en capítulos anteriores, el método RCM es un mantenimiento basado en la fiabilidad de los equipos, por lo que se ajusta a la perfección a sistemas pertenecientes a buques.

Por otro lado, al tener en cuenta el riesgo de cada modo de fallo para la realización de las tareas el coste del mantenimiento se reduce comparado con otro tipo de mantenimientos al tener una menor probabilidad de fallo.

Los costes asociados al mantenimiento, en un principio, parecen elevados si se tiene en cuenta el coste de los equipos, pero no sólo hay que tener en cuenta el coste que tienen los equipos, sino el coste que hubiera supuesto el fallo de dichos equipos, que puede ir asociado al fallo de otros equipos así como la parada del buque, con todos los costes que esto conlleva.

Por último, el método RCM va a ser la mejor opción en muchas de las instalaciones industriales debido a que en su plan de mantenimiento engloba muchos de los otros mantenimientos, como pueden ser: el mantenimiento predictivo, el mantenimiento preventivo programado, mantenimiento de sustitución programado, etc. La combinación de todos estos mantenimientos teniendo en cuenta cual es el que mejor se adecúa al equipo en cuestión según el riesgo de cada modo de fallo, confirma que el mantenimiento RCM es la mejor opción en muchas de las instalaciones industriales.

## 10. Desarrollos futuros

El método RCM es un plan de mantenimiento dinámico en el que se necesita la realimentación para obtener un óptimo mantenimiento de los equipos.

Durante el desarrollo del plan de mantenimiento es vital la anotación del número de fallos que se producen en cada equipo para el ajuste del MTBF del que se ha partido para el cálculo de las tareas. Los MTBF que proporcionan los fabricantes son datos obtenidos de la experiencia del equipo en instalaciones con condiciones similares, pero nunca dichas condiciones serán exactamente las mismas, por lo que el MTBF que se tiene al realizar los cálculos para efectuar las tareas posiblemente no sea exactamente el mismo, ya que las condiciones y el contexto operacional no será el mismo. La anotación del número de fallos de los elementos de la instalación durante el plan de mantenimiento proporcionará el MTBF real de cada equipo.

La modificación del MTBF supone el cambio de la tasa instantánea de fallos del modo de fallo, por lo que el riesgo también podría variar. Por estas razones habrá que revisar y recalcular los tiempos de la realización de las tareas con el objetivo de observar si es necesario alguna modificación en la periodicidad de éstas.

Por otro lado, se podría realizar un análisis RAMS (Reliability, Availability, Maintainability y Safety). De dicho análisis se obtendría la fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad de los equipos que serviría para obtener los elementos críticos dentro de la instalación, que posteriormente se podría estudiar la eliminación o cambio de dichos elementos por otros de mayor calidad (mayor MTBF).

En cuanto al futuro de la tecnología del mantenimiento, una posible vía de estudio y desarrollo es la intercambiabilidad de los componentes de un equipo. Para ello, sería necesario que el coste de las piezas intercambiables fuera muy reducido y de fácil acceso para que los encargados del mantenimiento realizaran el reemplazo de la pieza lo más rápido posible con el objeto de reducir el tiempo sin operar del elemento y con ello la menor pérdida económica para la empresa.

No existe un solo camino o un tipo de mantenimiento que sea el más óptimo para toda instalación industrial y bajo cualquier circunstancia. En la mayoría de los casos, la combinación de los distintos tipos de mantenimientos (que existen o que puedan llegar a desarrollarse y existir) es y, posiblemente será, la mejor opción.

## 11. Bibliografía

- [1] González Fernández, Francisco Javier. *Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado*. FC editorial. España. ISBN: 84-96169-0.
- [2] Documentación interna de la empresa Alten soluciones productos auditoria e ingeniería, S.A.U. 2013
- [3] Apuntes de la asignatura “ Tecnología de máquinas”.
- [4] Jones, Richard B. *Risk-Based Management: A Reliability Centered Approach*. Gulf Publishing Company.USA. 1995. ISBN: 0-88415-785-7.
- [5] Moubray, Jhon. *RCM II: Reliability Centered Maintenance*. Industrial Press Inc. USA. 1997. ISBN: 0-8311-3078-4.
- [6] Woodhouse, J. *Course of Reliability- Centered Maintenance, Section two: Failure Modes and Effects Analysis*. The Woodhouse Partnership. England. 1993.
- [7] Parra, Carlos. *Course of Reliability-Centered Maintenance*. Universidad de los Andes, Merida. Venezuela. 1998.
- [8] Creus, Antonio. *Fiabilidad y seguridad*.Edición.Marcombo. España. 1992. ISBN: 84-267-0853-6.
- [9] <ftp://ftp.iks-jena.de/pub/mitarb/lutz/standards/dstan/02/045/00000200.pdf> Última visita: 16/01/2014 20:30
- [10] <http://www.iit.upcomillas.es/docs/TM-04-007.pdf> Última visita: 16/01/2014 19:44
- [11] O'Connor, Patrick P. *Practical reliability engineering*. Wiley Interscience Publication, USA. 1984
- [12]<http://www.mailxmail.com/curso-motores-combustion-interna/que-es-motor-componentes-funcionamiento> Última visita: 16/01/2014 20:00
- [13] [http://www.hecisa.com/Filtros-gen-12-2\\_es.pdf](http://www.hecisa.com/Filtros-gen-12-2_es.pdf) Última visita: 16/01/2014 20:02
- [14]<http://shimge-pump.es/2-3-single-stage-centrifugal-pump.html/119252#.UcHqwNg8oRE> Última visita: 16/01/2014 20:04

[15] [http://www.iklimnet.com/expert\\_hvac/heat\\_exchangers\\_PHE.html](http://www.iklimnet.com/expert_hvac/heat_exchangers_PHE.html) Última visita: 16/01/2014 20:06

[16] [http://es.wikipedia.org/wiki/Intercambiador\\_de\\_calor\\_de\\_carcasa\\_y\\_tubos](http://es.wikipedia.org/wiki/Intercambiador_de_calor_de_carcasa_y_tubos) Última visita: 16/01/2014 20:08

[17] [https://www5.uva.es/guia\\_docente/uploads/2012/389/51453/1/Documento9.pdf](https://www5.uva.es/guia_docente/uploads/2012/389/51453/1/Documento9.pdf)  
Última visita: 16/01/2014 20:09

[18] [http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica\\_hidraulica30.htm](http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica_hidraulica30.htm) Última visita: 16/01/2014 20:10

[19] [http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica\\_hidraulica31.htm](http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica_hidraulica31.htm) Última visita: 16/01/2014 20:13

[20] [http://www.caleffi.com/es\\_ES/Technical\\_brochures/01129/01129.pdf](http://www.caleffi.com/es_ES/Technical_brochures/01129/01129.pdf) Última visita: 16/01/2014 20:14

[21] [http://www.circalefaccion.com/producto/tanques\\_de\\_expansion\\_baxi\\_italia\\_/458](http://www.circalefaccion.com/producto/tanques_de_expansion_baxi_italia_/458)  
Última visita: 16/01/2014 20:22

[22] [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Flanschverbindung\\_Gasleitung.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Flanschverbindung_Gasleitung.jpg) Última visita: 16/01/2014 20:23

[23] [http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp\\_331.pdf](http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp_331.pdf) Última visita: 16/01/2014 20:31